



**UNIVERSIDAD ESTATAL  
PENÍNSULA DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**TEMA:**

“DISEÑO DE UN MÉTODO PIROLÍTICO PARA RECICLAR RESIDUOS INDUSTRIALES COMO FUENTE DE ENERGÍA, EMPRESA CARTONERA ORENSE, ECUADOR.”

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**AUTOR:**

SALVATIERRA ROGEL BRYAN PATRICIO

**TUTOR:**

ING. VELIZ AGUAYO ALEJANDRO CRISÓSTOMO, PHD.

**LA LIBERTAD – ECUADOR**

**2024**

**UNIVERSIDAD ESTATAL**

---

**PENÍNSULA DE SANTA ELENA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**TEMA:**

**“DISEÑO DE UN MÉTODO PIROLÍTICO PARA RECICLAR RESIDUOS INDUSTRIALES COMO FUENTE DE ENERGÍA, EMPRESA CARTONERA ORENSE, ECUADOR.”**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**AUTOR:**

**SALVATIERRA ROGEL BRYAN PATRICIO**

**TUTOR:**

**ING. VELIZ AGUAYO ALEJANDRO CRISÓSTOMO, PHD.**

**LA LIBERTAD – ECUADOR**

**2024**

# CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Salvatierra Rogel Bryan Patricio**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Industrial**.

## TUTOR

f. 

**Ing. Veliz Aguayo Alejandro Crisóstomo, PhD.**

## DIRECTOR DE LA CARRERA

f. 

**Dra. Moreno Alcivar Lucrecia Cristina, PhD.**

**La Libertad, 3 de diciembre de 2024**

## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación “DISEÑO DE UN MÉTODO PIROLÍTICO PARA RECICLAR RESIDUOS INDUSTRIALES COMO FUENTE DE ENERGÍA, EMPRESA CARTONERA ORENSE, ECUADOR.”, elaborado por el Sr. SALVATIERRA ROGEL BRYAN PATRICIO, estudiante de la carrera de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingeniero Industrial, me permito declarar que luego de haberla dirigido, estudiado y revisado, la apruebo en su totalidad.

**TUTOR**

f.  \_\_\_\_\_

**Ing. Veliz Aguayo Alejandro Crisóstomo, PhD.**

**La Libertad, 3 de diciembre de 2024**

# DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Salvatierra Rogel Bryan Patricio**

## DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Diseño de un método pirolítico para reciclar residuos industriales como fuente de energía, empresa Cartonera Orense, Ecuador**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Industrial**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

**La Libertad, 3 de diciembre de 2024**

**AUTOR**

f. \_\_\_\_\_



**SALVATIERRA ROGEL BRYAN PATRICIO**

# AUTORIZACIÓN

Yo, **Salvatierra Rogel Bryan Patricio**

Autorizo a la Universidad Península de Santa Elena la **publicación** en la biblioteca de la Institución del Trabajo de Titulación, **Diseño de un método pirolítico para reciclar residuos industriales como fuente de energía, empresa Cartonera Orense, Ecuador**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**La Libertad, 3 de diciembre de 2024**

**AUTOR:**

f. 

**SALVATIERRA ROGEL BRYAN PATRICIO**

## CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema DISEÑO DE UN MÉTODO PIROLÍTICO PARA RECICLAR RESIDUOS INDUSTRIALES COMO FUENTE DE ENERGÍA, EMPRESA CARTONERA ORENSE, ECUADOR, elaborado por el Sr. SALVATIERRA ROGEL BRYAN PATRICIO, egresado de la carrera de Ingeniería de Industrial, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, previo a la obtención del Título de Ingeniero Industrial me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio Copilatio Master, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, la presente tesis, se encuentra con un 4% de la valoración permitida por consiguiente se procede a emitir el presente informe.

Adjunto reporte de similitud.

Atentamente,

**CERTIFICADO DE ANÁLISIS**  
ingrati

**Tesis Salvatierra antiplagio 29-11-24-1**

4% Similitud

- 1. Fuente: [illegible]
- 2. Fuente: [illegible]
- 3. Fuente: [illegible]
- 4. Fuente: [illegible]

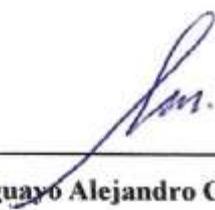
Resumen del documento: Tesis Salvatierra antiplagio 29-11-24-1.docx  
ID del documento: 17481122757164210302224494300840779  
Tamaño del documento original: 702 KB  
Autor(es): [illegible]

Reporte de: ALEJANDRO CRISÓSTOMO VELIZ AGUAYO  
Fecha de análisis: 2011-02-04  
Tipo de carga: [illegible]  
Fecha de la última actualización: 2011-02-04

Número de análisis: 22342  
Número de caracteres: 156476

Gráfico de la similitud en el documento:

FIRMA DEL TUTOR

f.   
**Ing. Veliz Aguayo Alejandro Crisóstomo PhD.**  
C.C.:

# CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA

---

Santa Elena, 30 de noviembre del 2024

Yo, **Mónica Isabel Paredes Castro**, Magíster en Educación Básica, con registro de la **SENECYT N° 1023-2024-2904505** por medio del presente certifico que:

Después de revisar y corregir la sintaxis y ortografía del trabajo investigativo titulado **“DISEÑO DE UN MÉTODO PIROLÍTICO PARA RECICLAR RESIDUOS INDUSTRIALES COMO FUENTE DE ENERGÍA, EMPRESA CARTONERA ORENSE, ECUADOR.”**, elaborado por el estudiante **BRYAN PATRICIO SALVATIERRA ROGEL** en su opción al título de **INGENIERO INDUSTRIAL** en la Universidad Estatal Península de Santa Elena, puedo afirmar que el trabajo está apto para ser defendido.

Sin otro particular.



Firmado digitalmente por  
**MONICA ISABEL  
PAREDES CASTRO**

**Lic. Mónica Paredes Castro, M.Sc.**

C.I: 0605353143

Celular: 0969917044

Correo: [misabelp1017@gmail.com](mailto:misabelp1017@gmail.com)

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis padres, Silvia Rogel y Patricio Salvatierra, quienes me han brindado todo su apoyo, guía y paciencia a lo largo de estos años. Su ejemplo de esfuerzo, dedicación y sacrificio ha sido mi mayor inspiración, y todo lo que soy se lo debo a ustedes. Gracias por creer en mí incluso en los momentos en los que dudé de mí mismo. A mis abuelos, que con su sabiduría y cariño han sido un pilar fundamental en mi vida. Sus consejos y enseñanzas han dejado una huella imborrable en mi corazón, y me han motivado a seguir adelante con determinación y fe. A mi familia y amigos, quienes han compartido conmigo risas, lágrimas y momentos inolvidables. Gracias por estar a mi lado en este viaje y por hacer que el trayecto haya sido más llevadero. Este logro es de todos ustedes, gracias por formar parte de mi vida y por ayudarme a alcanzar esta meta. A todos, mi más sincero agradecimiento y mi eterno cariño.

*Bryan Patricio Salvatierra Rogel*

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar este trabajo a quien ha sido el pilar fundamental en cada etapa de mi vida, mi abuela Silvia Aguilar. Su inquebrantable amor, su sabiduría acumulada y su ejemplo de fortaleza han sido las fuerzas que me han impulsado a superar cada desafío. Desde la infancia, ha sido mi guía y mi refugio, ofreciéndome siempre un consejo acertado y un abrazo reconfortante en los momentos más difíciles, le debo gran parte de lo que soy hoy. Este logro académico es tanto mío como suyo, una prueba viviente de los valores que me ha inculcado y de la fe que siempre ha depositado en mí. Gracias por ser mi inspiración, mi fortaleza y mi constante fuente de apoyo.

Con eterna gratitud y profundo aprecio.

*Bryan Patricio Salvatierra Rogel*

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

**DRA. LUCRECIA CRISTINA MORENO ALCÍVAR, PhD.**  
DIRECTOR DE CARRERA

f. 

**DRA. GRACIELA CELEDONIA SOSA BUENO, PhD.**  
DOCENTE ESPECIALISTA

f. 

**ING. VELIZ AGUAYO ALEJANDRO CRISÓSTOMO, PhD.**  
DOCENTE TUTOR

f. 

**DRA. GRACIELA CELEDONIA SOSA BUENO, PhD.**  
DOCENTE UIC

# ÍNDICE GENERAL

PORTADA .....	I
CERTIFICACIÓN.....	III
APROBACIÓN DEL TUTOR .....	IV
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....	V
AUTORIZACIÓN.....	VI
CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO .....	VII
CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA .....	VIII
AGRADECIMIENTOS .....	IX
DEDICATORIA .....	X
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	XI
ÍNDICE GENERAL .....	XII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVII
ÍNDICE DE ANEXOS .....	XIX
LISTA DE ABREVIATURAS Y TABLA DE SÍMBOLOS .....	XX
RESUMEN.....	XXI
ABSTRACT.....	XXII
INTRODUCCIÓN .....	1
MARCO TEÓRICO .....	10
1.1. Antecedentes investigativos.....	10
1.2. Estado del arte.....	12
1.2.1. Revisión bibliométrica.....	13
1.3. Fundamentos teóricos (variable independiente). .....	42
1.4. Fundamentos teóricos (variable dependiente).....	44
1.5. Recapitulación del capítulo 1. ....	46
MARCO METODOLÓGICO .....	48
2.1. Enfoque de investigación.....	48
2.2. Diseño de investigación.....	49
2.3. Procedimiento metodológico. ....	50
2.4. Población.....	51
2.5. Muestra. ....	51
2.6. Variable del estudio.....	53

<b>2.7. Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de los datos. ....</b>	<b>53</b>
2.7.1. Métodos de recolección de los datos. ....	54
2.7.2. Técnicas de recolección de los datos. ....	55
2.7.3. Instrumentos de recolección de los datos.....	55
2.7.4. Confiabilidad.....	56
2.7.5. Validez.....	56
<b>2.8. Procedimiento de recolección de datos.....</b>	<b>56</b>
<b>2.9. Aspectos éticos.....</b>	<b>58</b>
2.9.1. Operacionalización de las variables.....	60
<b>2.10. Plan de análisis e interpretación de datos.....</b>	<b>63</b>
<b>2.11. Recapitulación del capítulo II.....</b>	<b>64</b>
<b>MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>66</b>
<b>3.1. Marco de resultados.....</b>	<b>66</b>
3.1.1. Fase 1: revisión sistemática. ....	66
3.1.2. Fase 2: descripción de los datos.....	66
3.1.3. Validez de instrumento.....	69
3.1.4. Resultados del instrumento de recolección de datos.....	71
3.1.5. Fiabilidad del instrumento. ....	78
3.1.6. Verificación de hipótesis. ....	80
3.1.7. Ubicación de lodos de cartón y papel. ....	82
<b>3.2. Propuesta. ....</b>	<b>83</b>
3.2.1. Introducción. ....	83
3.2.2. Objetivo general.....	84
3.2.3. Objetivos específicos. ....	84
3.2.4. Metodología. ....	84
3.2.5. Evaluación de materia prima (lodos cartoneros). ....	85
3.2.6. Diseño del proceso de pirólisis. ....	90
3.2.7. Muestra de lodos residuales de cartón y papel.....	113
3.2.8. Análisis de producto (biochar).....	116
<b>3.3. Presupuesto.....</b>	<b>119</b>
<b>3.4. Análisis financiero.....</b>	<b>121</b>
3.4.1. Indicadores de inversión. ....	121
<b>3.5. Marco de discusión .....</b>	<b>123</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>127</b>

<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>128</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>129</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>140</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Delimitación del estudio.</i> .....	7
<b>Tabla 2.</b> <i>Preguntas de investigación para revisión bibliométrica.</i> .....	15
<b>Tabla 3.</b> <i>Selección de base de datos.</i> .....	17
<b>Tabla 4.</b> <i>Criterios de búsqueda de publicaciones.</i> .....	18
<b>Tabla 5.</b> <i>Identificación de técnicas utilizadas por los artículos.</i> .....	26
<b>Tabla 6.</b> <i>Desarrollo de matriz ponderada.</i> .....	28
<b>Tabla 7.</b> <i>Resultados obtenidos AHP (técnicas).</i> .....	29
<b>Tabla 8.</b> <i>Cálculo de consistencia (AHP técnicas).</i> .....	29
<b>Tabla 9.</b> <i>Identificación de instrumentos utilizados en artículos.</i> .....	30
<b>Tabla 10.</b> <i>Resultados obtenidos AHP (instrumentos).</i> .....	32
<b>Tabla 11.</b> <i>Matriz referencial de artículos de investigación.</i> .....	33
<b>Tabla 12.</b> <i>Trabajadores del departamento de ambiente.</i> .....	51
<b>Tabla 13.</b> <i>Muestra estratifica de trabajadores.</i> .....	53
<b>Tabla 14.</b> <i>Muestreo por conveniencia.</i> .....	53
<b>Tabla 15.</b> <i>Procedimiento de recolección de datos.</i> .....	57
<b>Tabla 16.</b> <i>Operacionalización de variables.</i> .....	60
<b>Tabla 17.</b> <i>Plan de análisis e interpretación de resultados.</i> .....	63
<b>Tabla 18.</b> <i>Criterios de inclusión y exclusión de expertos.</i> .....	69
<b>Tabla 19.</b> <i>Expertos seleccionados para validez de instrumento.</i> .....	70
<b>Tabla 20.</b> <i>Resultados obtenidos de validez por expertos.</i> .....	70
<b>Tabla 21.</b> <i>Resultados obtenidos de dimensión 1.</i> .....	71
<b>Tabla 22.</b> <i>Resultados obtenidos de dimensión 2.</i> .....	72
<b>Tabla 23.</b> <i>Resultados obtenidos de dimensión 3.</i> .....	74
<b>Tabla 24.</b> <i>Resultados obtenidos de dimensión 4.</i> .....	75
<b>Tabla 25.</b> <i>Resultados obtenidos de dimensión 5.</i> .....	77
<b>Tabla 26.</b> <i>Datos procesados de instrumento.</i> .....	79
<b>Tabla 27.</b> <i>Resultado de alfa de Cronbach.</i> .....	79
<b>Tabla 28.</b> <i>Rangos y magnitud de alfa de Cronbach.</i> .....	79
<b>Tabla 29.</b> <i>Datos estadísticos descriptivos del instrumento.</i> .....	81
<b>Tabla 30.</b> <i>Prueba de normalidad.</i> .....	81
<b>Tabla 31.</b> <i>Composición de residuos de cartón corrugado.</i> .....	86
<b>Tabla 32.</b> <i>Cantidad de generación de residuos cartoneros.</i> .....	86

<b>Tabla 33.</b>	<i>Ensayos de lodos cartoneros.....</i>	<i>89</i>
<b>Tabla 34.</b>	<i>Análisis proximal de lodo cartonero.....</i>	<i>90</i>
<b>Tabla 35.</b>	<i>Poder calorífico de combustibles.....</i>	<i>94</i>
<b>Tabla 36.</b>	<i>Productos obtenidos de condensación.....</i>	<i>103</i>
<b>Tabla 37.</b>	<i>Gases purificados y eliminados de sello de agua.....</i>	<i>104</i>
<b>Tabla 38.</b>	<i>Prueba de reducción de residuos de cartón.....</i>	<i>114</i>
<b>Tabla 39.</b>	<i>Análisis proximal.....</i>	<i>117</i>
<b>Tabla 40.</b>	<i>Análisis elemental.....</i>	<i>118</i>
<b>Tabla 41.</b>	<i>Tabla comparativa de combustibles.....</i>	<i>119</i>
<b>Tabla 42.</b>	<i>Presupuesto de inversión.....</i>	<i>120</i>
<b>Tabla 43.</b>	<i>Flujo de caja neto.....</i>	<i>121</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Procedimiento de revisión bibliométrica</i> .....	14
<i>Figura 2. Proceso de selección de publicaciones</i> .....	19
<i>Figura 3. Cronología de los artículos publicados</i> .....	20
<i>Figura 4. Análisis de Coocurrencia</i> .....	21
<i>Figura 5. Análisis de co – citas por autores</i> .....	22
<i>Figura 6. Análisis de co – citación de Notas o revistas</i> .....	23
<i>Figura 7. Red de colaboración de países</i> .....	24
<i>Figura 8. Análisis de citación de artículos</i> .....	25
<i>Figura 9. Diagrama de técnicas utilizadas de artículos</i> .....	27
<i>Figura 10. Elementos de AHP (Técnicas)</i> .....	27
<i>Figura 11. Agrupación de instrumentos en técnicas (AHP instrumentos)</i> .....	31
<i>Figura 12. Fases de procedimiento metodológico</i> .....	50
<i>Figura 13. Plan de recolección de datos</i> .....	54
<i>Figura 14. Validación por juicios de expertos</i> .....	55
<i>Figura 15. Ubicación de la empresa cartonera orense</i> .....	67
<i>Figura 16. Organigrama de la empresa</i> .....	67
<i>Figura 17. Mapa de procesos</i> .....	68
<i>Figura 18. Diagrama de resultados de Dimensión 1</i> .....	72
<i>Figura 19. Diagrama de resultados de Dimensión 2</i> .....	73
<i>Figura 20. Diagrama de resultados de Dimensión 3</i> .....	75
<i>Figura 21. Diagrama de resultados de Dimensión 4</i> .....	76
<i>Figura 22. Diagrama de resultados de Dimensión 5</i> .....	78
<i>Figura 23. Distribución de área en empresa cartonera Orense</i> .....	82
<i>Figura 24. Metodología para diseño de proceso pirolítico</i> .....	85
<i>Figura 25. Depósito de residuos de cartón y papel</i> .....	87
<i>Figura 26. Tratamiento de residuos a lodos de cartón y papel</i> .....	87
<i>Figura 27. Método de pirólisis (torrefacción lenta)</i> .....	92
<i>Figura 28. Proceso de trabajo</i> .....	93
<i>Figura 29. Diagrama de entrada y salida (Precalentamiento)</i> .....	94
<i>Figura 30. Diagrama de calentamiento de reactor</i> .....	95
<i>Figura 31. Diagrama de entrada y salida (Sistema de alimentación)</i> .....	95
<i>Figura 32. Diagrama de alimentación de reactor</i> .....	96

<i>Figura 33. Diagrama de entrada y salida (Proceso de pirólisis)</i> .....	97
<i>Figura 34. Diagrama de reactor de pirólisis</i> .....	98
<i>Figura 35. Diagrama de entrada y salida (transporte de biochar)</i> .....	98
<i>Figura 36. Sistema de transporte de biochar con enfriamiento</i> .....	99
<i>Figura 37. Diagrama de entrada y salida (Peletizado de biochar)</i> .....	99
<i>Figura 38. Sistema de peletizado de biochar</i> .....	100
<i>Figura 39. Diagrama de entrada y salida (Colector de gases)</i> .....	101
<i>Figura 40. Proceso de colección de gases</i> .....	101
<i>Figura 41. Diagrama de entrada y salida (Condensación y enfriamiento)</i> .....	102
<i>Figura 42. Diagrama de sistema de condensación y enfriamiento</i> .....	102
<i>Figura 43. Diagrama de entrada y salida (sello de agua)</i> .....	104
<i>Figura 44. Diagrama de sistema de purificación</i> .....	105
<i>Figura 45. Diagrama de entrada y salida (combustión con gas de síntesis)</i> .....	105
<i>Figura 46. Transporte de gas de síntesis para quemadores</i> .....	106
<i>Figura 47. Diagrama de entrada y salida (quema de gas excedente)</i> .....	106
<i>Figura 48. Proceso de quema de gas de síntesis</i> .....	107
<i>Figura 49. Diagrama de entrada y salida (Transporte de gases)</i> .....	107
<i>Figura 50. Recepción de gases de combustión</i> .....	108
<i>Figura 51. Diagrama de entrada y salida (Condensación de gases de escape)</i> .....	108
<i>Figura 52. Diagrama de tubo de condensación de gases</i> .....	109
<i>Figura 53. Sistema de tratamiento de gases de escape</i> .....	110
<i>Figura 54. Sistema de tratamiento de gases de escape</i> .....	110
<i>Figura 55. Diseño de proceso pirolítico para residuos de cartón</i> .....	111
<i>Figura 56. Diagrama de proceso pirolítico para lodos cartoneros</i> .....	112
<i>Figura 57. Sistema de enfriamiento y recepción de agua utilizada</i> .....	113
<i>Figura 58. Análisis termogravimétrico de lodos cartonero</i> .....	116
<i>Figura 59. Gráfica de VAN y TIR</i> .....	122

## ÍNDICE DE ANEXOS

<i>Anexo A. Cálculo de proceso analítico jerárquico (AHP).</i> .....	140
<i>Anexo B. Instrumento de recolección de datos.</i> .....	141
<i>Anexo C. Validación de instrumento por criterio de juicio de expertos.</i> .....	142
<i>Anexo D. Recopilación de datos en SPSS 25 y Google Forms.</i> .....	148
<i>Anexo E. Modelo de proceso de pirólisis - Beston Group.</i> .....	149
<i>Anexo F. Proceso de tratamiento de lodos cartoneros en empresa.</i> .....	149
<i>Anexo G. Depósito de residuos cartoneros tratados.</i> .....	150
<i>Anexo H. Plano de medidas de proceso pirolítico.</i> .....	151
<i>Anexo I. Análisis proximal y termogravimétrico (TGA).</i> .....	152
<i>Anexo J. Ficha técnica de planta de pirólisis.</i> .....	154

## LISTA DE ABREVIATURAS Y TABLA DE SÍMBOLOS

Tasa interna de retorno	<b>TIR</b>
Valor actual neto	<b>VAN</b>
Megajulios por kilogramo	<b>MJ/kg</b>
Grados Celsius	<b>°C</b>
Paquete estadístico para las ciencias sociales	<b>SPSS</b>
Análisis termogravimétrico	<b>TGA</b>
Nitrógeno	<b>N<sub>2</sub></b>
Dióxido de carbono	<b>CO<sub>2</sub></b>
Agua	<b>H<sub>2</sub>O</b>
Oxígeno	<b>O<sub>2</sub></b>
Monóxido de carbono	<b>CO</b>
Carbono	<b>C</b>
Hidrógeno	<b>H</b>
Nitrógeno	<b>N</b>
Azufre	<b>S</b>
Coefficiente de variación	<b>CV</b>
Desulfuración de gases de combustión	<b>FGD</b>
Curva característica del receptor	<b>ROC</b>
Índice de pirólisis	<b>PI</b>
Índice de torrefacción rápida	<b>ITR</b>
Análisis de componentes principales	<b>PCA</b>
Gases de combustión	<b>GAS</b>
Potencial volátil	<b>PV</b>
Biogás de síntesis	<b>BS</b>

# “DISEÑO DE UN MÉTODO PIROLÍTICO PARA RECICLAR RESIDUOS INDUSTRIALES COMO FUENTE DE ENERGÍA, EMPRESA CARTONERA ORENSE, ECUADOR.”

**Autor:** Bryan Patricio Salvatierra Rogel

**Tutor:** Ing. Alejandro Crisóstomo Veliz Aguayo, PhD.

## RESUMEN

La industria del papel y cartón ha tenido un notable crecimiento en las últimas décadas, lo que ha llevado a una mayor generación de residuos industriales, especialmente los lodos residuales, que representan una carga ambiental significativa. Este estudio tuvo como objetivo diseñar un método pirolítico para reciclar los residuos industriales en la empresa Cartonera Orense, buscando reducir los desechos y aprovecharlos como fuente de energía renovable. El enfoque de la investigación fue cuantitativo, utilizando un diseño no experimental transversal. Se aplicaron encuestas estructuradas a una muestra de 20 trabajadores del departamento ambiental, con validación mediante juicio de expertos y un coeficiente alfa de Cronbach de 0.820, indicando una alta fiabilidad del instrumento. Además, se utilizó el análisis de Kolmogorov Smirnov para validar la distribución de las respuestas. El proceso pirolítico se basó en la torrefacción de los lodos residuales a temperaturas de 250 a 300 °C, lo que mejoró el poder calorífico del material y permitió su conversión en biochar, con un poder calorífico de 23.17 MJ/kg. Los resultados mostraron que el proceso de torrefacción fue efectivo para transformar los lodos de cartón en una fuente de energía viable, con un análisis financiero favorable que reveló una TIR de 18.52% y un VAN positivo de \$9,009. Esto indica que el proyecto es económicamente viable y contribuye a la sostenibilidad ambiental de la empresa. En conclusión, el diseño propuesto para reciclar los residuos industriales mediante pirólisis es viable tanto ambiental como económicamente. El proceso no solo optimiza los desechos, sino que también ofrece una fuente de energía renovable, mejorando la eficiencia operativa de la empresa Cartonera Orense.

**Palabras clave:** *Pirólisis, residuos industriales, torrefacción, biochar, energía renovable, medio ambiente.*

# “DESIGN OF A PYROLYTIC METHOD TO RECYCLING INDUSTRIAL WASTE AS A SOURCE OF ENERGY, CARDBOARD COMPANY FROM EL ORO, ECUADOR”

**Autor:** Bryan Patricio Salvatierra Rogel

**Tutor:** Ing. Alejandro Crisóstomo Veliz Aguayo, PhD.

## ABSTRACT

The paper and cardboard industry has had a remarkable growth in recent decades, which has led to an increased generation of industrial waste, especially sewage sludge, which represents a significant environmental burden. This study aimed to design a pyrolytic method to recycle industrial waste in the Cartonera Orense company, seeking to reduce waste and use it as a source of renewable energy. The research approach was quantitative, using a non-experimental cross-sectional design. Structured surveys were applied to a sample of twenty workers of the environmental department, with validation by expert judgment and a Cronbach's alpha coefficient of 0.820, indicating a high reliability of the instrument. In addition, Kolmogorov-Smirnov analysis was used to validate the distribution of responses. The pyrolytic process was based on torrefaction of the sewage sludge at temperatures of 250 to 300 °C, which improved the calorific value of the material and allowed its conversion into biochar, with a calorific value of 23.17 MJ/kg. The results showed that the torrefaction process was effective in transforming the cardboard sludge into a viable energy source, with a favorable financial analysis revealing an IRR of 18.52% and a positive NPV of \$9,009. This indicates that the project is economically viable and contributes to the environmental sustainability of the company. In conclusion, the proposed design to recycle industrial waste through pyrolysis is both environmentally and economically viable. The process not only optimizes waste, but also provides a renewable energy source, improving the operating efficiency of the Cartonera Orense company.

**Key words:** *Pyrolysis, industrial waste, torrefaction, biochar, renewable energy, environment.*

# INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la industria del cartón y papel ha obtenido un elevado aumento de utilización en los distintos sectores, como en el empaquetado o embalaje, en el saneamiento, en las industrias alimentarias, de la construcción y en los entornos publicitarios, es decir, que tiene un amplio desempeño para la comodidad de las personas. Por otro lado, se entiende que existe una alta dificultad con relación a los residuos industriales y la gestión, que tiene una alta carga para el medio ambiente. De forma específica, la generación de lodos en esta industria es un método que permite su reutilización en derivados, destinado al uso como un material de construcción, como un combustible distinto, promoviendo su reciclaje y reutilización, en lugar de las prácticas tradicionales de gestión de residuos (Kumar & Verma, 2024). Entonces, se señala que este enfoque está dirigido a procesos pirolíticos que implica el desarrollo de nuevos productos de alto valor, por lo que se obtiene oportunidades en la economía circular.

Manea & Bumbac (2024) indican que los lodos residuales, en forma general, son vistos como residuos y que en su mayoría se expulsan a través de la aplicación de técnicas costosas y perjudiciales para el medio ambiente. Este tipo de prácticas se propone como una alternativa ecológica y sustentable para manejar los lodos biodegradables. Esto conlleva a la combinación con elementos estructurales, como desechos agrícolas, con el fin de balancear la relación entre carbono y nitrógeno. El compostaje posibilita disminuir los gastos de eliminación, las emisiones de gases de efecto invernadero y el efecto en el medio ambiente de la administración de lodos. No obstante, este enfoque se torna insostenible al ser un proceso extenso que incrementa el almacenamiento y resulta inviable en industrias con un elevado flujo de residuos.

En el artículo de Or et al. (2024) plantea que la utilización del lodo proveniente de los productos papeleros, se puede producir etanol a parte de un proceso térmico conocido como pirólisis, que es utilizado como un método al reciclaje de desechos en la industria, por motivo que su contenido es de 40% a 80% de celulosa, de 5% a 15% de hemicelulosa y de una proporción baja de lignina, este último es usado para generación de biocombustible, además se determinó que uno de los productos derivados de la pirólisis es el biochar. Esta tecnología de transformación de desechos en energía (waste-to-energy) optimiza la eficacia de los recursos y reduce los residuos, en concordancia con los principios de la economía circular. De esta forma, el bioetanol depende de un refinamiento correcto y de la filtración dentro de su producción, de esta manera se consigue el bio-oil, que es un mejor nivel para la viabilidad de las empresas privadas.

Silva et al. (2020) señalan que, a pesar de su desarrollo constante, se comprende que en América Latina y el Caribe, estas tecnologías no han contribuido para el tratamiento de los crecientes volúmenes de residuos en la región y no han satisfecho la demanda energética y cumplir los objetivos de reducción de carbono. Se identificó la complejidad técnica, los altos costos de inversión y la falta de investigación, así como las deficiencias políticas más generales, como los principales impedimentos para su implementación adecuada, particularmente en las plantas a gran escala. Además, estos hallazgos reconocen el potencial de estas tecnologías para mejorar los sistemas de gestión de residuos y energía, disminuyendo el impacto ambiental, otorgando beneficios tanto sociales como económicos y adquiriendo el acceso a una fuente de energía sostenible.

La gestión de residuos sólidos y la creciente demanda de energía a nivel global destacan que los desechos (comerciales, industriales o sanitarios) pueden usarse como combustible alternativo para reducir el impacto ambiental. El proceso de briquetado se presenta como una opción para mejorar la eficiencia de combustión, además de facilitar su manejo y gestión, permitiendo una evaluación del potencial de esta técnica, luego se lo presenta como una solución para introducir combustibles alternativos en países en desarrollo. Se señala que, las briquetas hechas de residuos agrícolas y de madera son los más investigados, seguidos por los de plástico, papel y cartón. Las briquetas se dividen en tres categorías según su valor calorífico: basados en biomasa ( $16.22 \pm 1.65$  MJ/kg), madera ( $19.03 \pm 2.46$  MJ/kg) y una combinación de plásticos y carbón ( $24.64 \pm 5.29$  MJ/kg). Se enfatiza la ausencia de estudios sobre emisiones internas y pruebas de ebullición de agua para valorar las briquetas en sistemas de calefacción y cocción, además de enfatizar la relevancia de poner en marcha tecnologías apropiadas para la generación de energía y la administración de desechos en estos países (Ferronato et al., 2022).

En México se presenta una metodología que integra la programación no lineal (PNL), para la optimización multi objetivo y multi período; abordando los desafíos en la gestión sostenible de residuos y la conversión de energía, que incorpora tecnologías basadas en el modelo waste to energy, como la digestión anaeróbica (DA), incineración (Inc), gasificación (Gsf) y pirólisis (Py). Se consideran aspectos termoquímicos, técnicos, económicos y ambientales a través de funciones no lineales, en donde la opción más óptima de forma económica llega a generar un 1.79 millones de dólares con una emisión de 954 toneladas de CO<sub>2</sub> produciendo un total 5960 MWh/día, mientras que la solución ambiental solo produce un total 0.91 millones de dólares a partir de una disminución de 54% de la emisiones y que se

alcanza una producción de 9500 MWh/día, que implica tecnologías como la gasificación (Hernández et al., 2024). El estudio señala un conflicto latente entre los beneficios empresariales y los ambientales, que están ligados intrínsecamente a la ética empresarial.

Un estudio realizado en Ecuador del análisis de biocombustibles, con el objetivo de evaluar el proceso de co-pirólisis de la mezcla de biomasa lignocelulósica con residuos plásticos de poliestireno y polipropileno para obtener biocombustible, también se determinó sus características fisicoquímicas. Se concluyó que el biocombustible T2-C2 obtuvo un mayor rendimiento (73%), esto debido a que su formación polimérica tiene una fácil despolimerización por aditivos de calor; sin embargo, si se excede dicha temperatura, se forman gases, por lo cual es utilizable como aditivo de combustibles convencionales (Ulpo et al., 2023). Lo que demuestra este trabajo es una vista a la co-pirólisis, donde se describe con exactitud el proceso pirolítico y materias base para generar un biocombustible sostenible, permitiendo no solo la reducción de residuos, sino también la generación de productos útiles a la sociedad.

Orejuela et al. (2021) señala el preocupante incremento de la producción de residuos industriales en base al aumento de la población, en su artículo describe un nexo entre la bioeconomía circular, la tecnología zero waste y el desarrollo sostenible, planteando alternativas para mitigar el impacto ambiental. Se detallan las importaciones del país, estrechamente relacionadas con la industria del cartón, enfatizando la relevancia de aumentar la competitividad industrial y mejorar la balanza comercial. Subraya la importancia de contar con tecnologías innovadoras que promuevan la sustitución de combustibles fósiles, incentivando la generación de procesos e industrias más amigables con el entorno. Es por esto, que se analizan investigaciones acerca de la fabricación de bioproductos obtenidos de la biomasa, como son refinamiento de etanol por hidrotermal de residuos orgánicos, en la que se puede mejorar su productividad y la rentabilidad de la industria local.

Se evidencia por parte de las investigaciones de reciente publicación, que los procesos de producción de bioenergía tienen un alto valor para el Ecuador, dando un beneficio a la economía que es sustentada por la agricultura, por lo tanto, el crecimiento de la industria cartonera es motivo de una existente demanda de envases o recipientes para transportar de forma accesible a los distintos sectores comerciales, por lo que al final son usados en distintos métodos termoquímicos para producción de biocombustibles. Aunque su mayor aplicación se realiza en pruebas de laboratorio, pueden ser vistos como el fundamento para su aplicación en el ámbito industrial. Las aplicaciones de los subproductos van desde la biomedicina, al

tratamiento de aguas residuales y producción de hidrógeno, reduciendo el problema de la disposición de residuos (Ponce et al., 2021). Resalta el potencial de desarrollar la bioeconomía, y fortalecer la agroindustria sostenible, impulsando nuevas tecnologías para gestionar los residuos y el hecho de planificar un modelo de economía circular.

En estos últimos años, se demuestra el alto interés de la industria cartonera del Ecuador en la aplicación de soluciones que permitan una administración de desechos de forma sostenibles, de forma especial a los lodos de celulosa. Este mismo pensamiento se vincula con las corrientes mundiales que se dirigen a la economía circular y a la sostenibilidad, que buscan la reducción de desperdicios y la optimización de recursos. Para la creación de los procedimientos de pirólisis son motivados como retos emergentes para el reciclaje de cartón, al mismo tiempo, satisface a la demanda medioambiental y determina referencias de prácticas sustentables en la industria del cartón en el país.

Es por esto mismo, la necesidad de un método pirolítico en función a un tratamiento de los lodos generados por la empresa de estudio, que pueda reducir los residuos industriales del país de forma considerable. Además, que el producto final tenga su uso como fuente de energía, que alimente a sistemas importantes en la industria cartonera mientras que es usado como una forma más sostenible de gestionar los residuos.

### **Planteamiento del problema.**

La industria del papel y el cartón es parte importante de las actividades económicas de las empresas de manufactura, con el aumento de la población seguirán creciendo y desarrollándose estas actividades, se estima que la demanda aumenta entre el 0.5% y el 0.8% anual. Hoy en día, el 50% de la producción mundial de cartón se encuentra en América, el 26% se ubica en Asia, el 21% en Europa y cerca del 3% en África (Harif et al., 2021). Se entiende que un aumento en la producción, tiene como resultado en una mayor generación de residuos en las empresa de una forma global, y de forma específica a quienes no contengan una gestión adecuada de los desechos debido a que son considerados como de baja prioridad y que su reciclaje que se realiza de forma correcta, provocando el aumento de los efectos negativos en su entorno por el desconocimiento de la conversión de este mismo residuos a un recurso valiosos para su uso dentro de la producción principal de estas industrias.

En numerosos países en vías de desarrollo, la administración de lodos residuales es inadecuada, generando un problema global para el medio ambiente. Bolivia representa un caso relevante para abordar el desarrollo del tema, ya que evidencian a otros países que el cartón puede convertirse en biocombustibles, disminuyendo de esta manera el impacto climático en

comparación con combustibles fósiles tradicionales, como el metano y el carbono según Ferronato et al., (2023). De esta manera, se presenta como una excelente opción el combustible alternativo, donde se subraya la relevancia en la administración de desechos porque permiten minimizar estos efectos ambientales.

Como nos indica Amaya et al. (2020) las investigaciones en Ecuador, específicamente en Guayaquil han identificado que los residuos industriales cuentan con un alto potencial para la producción de otras energías. Esto no solo optimiza el aprovechamiento de excedentes inutilizables, sino que se vuelven recursos aprovechables para el día a día, como el aceite de cocina usado para generar biodiesel y otras formas de energía. Gestionando correctamente estos desechos podemos dar viabilidad a proyectos sostenibles y aprovechables para los pequeños países.

Por lo tanto, se propone un método pirolítico para reciclar los residuos empresariales. Este método se considera viable por motivo de necesidad de encontrar soluciones innovadoras que permitan a empresas reducir el impacto ambiental, y mejorar su competitividad en entornos industriales, debido a que cada día se vuelven más exigentes tanto la planificación como la modelación de los procesos, ya que es una herramienta clave para garantizar la eficiencia operativa y económica del proyecto.

### **Formulación del problema de investigación.**

¿Cómo permite un método pirolítico a mejorar en la administración sostenible de desechos industriales, además, en la generación de energía en la empresa Cartonera Orense?

¿Qué técnicas y herramientas están presentes en el manejo de desechos industriales para la elaboración de un proceso pirolítico específico a los lodos cartoneros?

¿Qué metodología es apropiada para la identificación de las técnicas e instrumentos de recopilación de datos para garantice la información necesaria para verificar la propuesta del estudio?

¿Cómo se han demuestran los resultados obtenidos en base al diseño del método pirolítico en la gestión de residuos industriales?

### **Hipótesis.**

#### **Hipótesis general.**

La propuesta del proceso pirolítico permite aprovechar de forma eficiente los residuos industriales, generando energía renovable y subproductos de valor.

### **Hipótesis específicas.**

HIP1. El nivel de comprensión sobre el reciclaje y los procedimientos aplicados en la empresa tienen una alta influencia en relación con la eficacia de la gestión de los desechos industriales de cartón.

HIP2. Tanto el reciclaje de desechos industriales como el método pirolítico ejercen un efecto notable en la disminución de impactos perjudiciales en el medio ambiente y en la utilización eficaz de los desechos.

HIP3. La visión de los empleados acerca del método pirolítico porque tiene un impacto considerable en su adopción y uso en la compañía.

### **Alcance de la investigación.**

Se resalta que con la elaboración del método pirolítico el reciclaje de residuos generados por la empresa Cartonera Orense, sea considerado como una fuente de energía, por esto, se realiza este estudio de forma detallada. Para lograr un alineamiento adecuado con el tema de estudio, es necesario entender los aspectos importantes de la indagación y su vez la relevancia de la aplicación, que posibilita futuros resultados apropiados.

La aplicación se encuentra en el ámbito de la eco innovación en procedimientos industriales. A partir del aprovechamiento de los residuos cartoneros como una fuente de energía, se resalta la reducción de desechos y la mitigación del impacto ambiental de los procesos presentes de la industria. Esto demuestra que el estudio puede ser aplicado de forma correcta en el sector cartonero, donde se generan lodos cartoneros como métodos de tratamiento de residuos.

### **Aspectos clave.**

- Se analizan las propiedades fisicoquímicas del lodo de cartón y papel limitándose a determinar su capacidad para ser reciclado a través del método pirolítico.
- La propuesta se lleva a cabo a través de programas especializados para mejorar un método pirolítico adecuado, teniendo en cuenta aspectos como la temperatura, la presión y dimensiones de la instalación.
- Se analizan los residuos para ser convertidos en un recurso de energía sostenible mediante el procedimiento pirolítico.
- Con cálculos exactos de los rubros asociados (instalación, funcionamiento y mantenimiento), se obtiene la viabilidad de la propuesta por medio de indicadores financieros implicados.

## Delimitación.

**Tabla 1.**

*Delimitación del estudio.*

<b>Espacio</b>	<b>Empresa cartonera orense, Machala, El Oro, Ecuador.</b>	
<b>Tiempo</b>	Julio – Noviembre, 2024	
	<b>Población</b>	<b>Muestra</b>
<b>Universo</b>	Todos los residuos generados por la empresa cartonera orense durante el periodo determinado.	Selección representativa de los lodos residuales.

Nota: Elaborado por autor.

## Exclusiones

- Aplicaciones fuera del ámbito industrial, si bien los resultados pueden tener implicaciones para la gestión de residuos a nivel municipal, el enfoque estará en la aplicación industrial específica.
- Los aspectos legales y regulatorios, aunque son relevantes para la implementación práctica, los específicos no serán abordados en profundidad en este estudio, sin embargo, pueden ser considerados como recomendaciones futuras.

## Justificación de la investigación.

Una de las principales preocupaciones actuales es el creciente volumen de residuos industriales particularmente son aquellos derivados de material celulósicos como es el papel y el cartón. Esta acumulación representa un desafío para el medio ambiente y numerosas empresas que deben gestionar estos residuos fibrosos, pues afecta a los recursos naturales. Se debe reconocer que a los desechos se les puede dar una nueva oportunidad de ser reutilizados, mediante el reciclaje y distintos procesos químicos, que de entre ellos destaca uno, el método pirolítico, de esta forma disminuirá el impacto en la huella ecológica, y generará oportunidades infinitas para nuevas generaciones.

La investigación tiene una justificación teórica porque está sustentada en los principios termodinámicos, según Abdallah et al. (2020), la pirólisis es un proceso de descomposición termoquímica que se lleva a cabo a altas temperaturas sin la presencia de oxígeno, este proceso produce otro compuesto o desecho se pueda reciclar sacándole el máximo potencial al producto final, es decir que podemos reutilizar estos residuos como el papel y cartón para crear algo innovador, ya sea un producto nuevo o combustible.

La investigación se encuentra justificada de manera práctica debido a la realidad que enfrenta nuestra sociedad, y que el resto busca ignorar. A través de programas en computadora,

se genera un método óptimo para dar provecho a estos excedentes, y busca así reducir el impacto a la huella ecológica. Además, la investigación presenta un enfoque innovador para potenciar a generaciones futuras con el uso de este tipo de energías renovable. Como nos indica Liu et al. (2021), los recursos que nos rodean tienen una amplia gama de utilidades ofreciendo aplicaciones prometedoras. Comprendiendo esto, podemos dar pie a que los procesos pirolíticos, por lo que se reutiliza materiales industriales que servirían como fuentes viables de bioenergía, contribuyendo a la reducción de costos energéticos, satisfaciendo las necesidades internas de la industria de una manera más ecológica.

Cuenta con una respectiva justificación metodológica, porque emplea instrumentos y herramientas para modelar procesos pirolíticos, validando así el rendimiento de este método y a su vez asegurando que estos cumplan con estándares ambientales adecuados. Por otro lado, el uso de tecnología disminuye el tiempo debido a la precisión de los resultados que se obtienen y al ajuste rápido que pueden lograr optimizando los recursos. Para Palmay et al. (2021), los procesos de pirólisis deben emplear ciertos instrumentos, y parámetros que generen un producto óptimo, debido a que estos tienen que llegar a temperaturas elevadas a más de 350 °C, por esa razón, si no se implementan las técnicas necesarias, sería un desperdicio de tiempo y de recursos.

También esta investigación describe la justificación social debido a que promueve a personas a reutilizar, para efectuar en industrias este proceso de pirólisis como una solución al manejo de residuos industriales. Para Acosta et al. (2021) la pirólisis ayuda a la gestión de residuos sólidos urbanos, que pueden producir combustible ecológico o biocombustible, generando beneficios socioeconómicos y a su vez disminuyendo la emisión de gases tóxicos que terminan en el aire, contaminando a personas y provocando enfermedades pulmonares. Establecer un método de pirólisis es esencial para procesar productos derivados de la celulosa, reinsertándolos así a las industrias como un producto aprovechable.

## **Objetivos**

### **Objetivo General:**

Diseñar un método pirolítico para reciclar los residuos industriales con el fin de reducir los desechos y aprovecharlos como fuente de energía en una empresa Cartonera Orense.

### **Objetivos Específicos:**

OBJ1 Realizar un estado del arte a partir del análisis de documentación y literatura científica para la obtención de información sobre el tratamiento de residuos industriales.

OBJ2 Desarrollar un enfoque metodológico mediante técnicas e instrumentos de recolección de datos para el análisis de los residuos generados por la empresa de estudio.

OBJ3 Describir los resultados del método pirolítico a través de la elaboración del proceso en programas pertinentes para su viabilidad en la conversión de residuos en la empresa Cartonera Orense.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1. Antecedentes investigativos

El estudio de Jeremiah et al. (2023) publicado en la revista de energía, está centrado en el desafío global de la contaminación por residuos plásticos y la depleción de combustibles fósiles. Se explica que la producción y el consumo de plásticos han aumentado significativamente desde la década de 1950, esto ha provocado la generación de grandes cantidades de residuos que han contaminado el medio ambiente y la afectación a la vida acuática. Por lo tanto, la investigación indica a la pirólisis de residuos plásticos como una solución viable, esto implica la degradación térmica de polímeros en ausencia de oxígeno para producir aceite de pirólisis, gas y carbón. Es por esto que se propone el establecer la viabilidad técnica y económica de la pirólisis de residuos plásticos para producir combustibles alternativos. Además, se sugiere que este método permita la reducción de la demanda de petróleo virgen y proporcione una solución sostenible para la gestión de residuos plásticos. Como resultado del estudio, se determina que la pirólisis de plásticos puede generar aceite con propiedades similares al diésel, es decir, se convierte en un sustituto viable para combustibles fósiles en aplicaciones de generación de energía y su uso en el transporte.

Por otro lado, Graça et al. (2024), en su estudio titulado tecnología de pirólisis con uso en la elaboración de biocarbón, publicado en la revista energía limpia, ha indicado que, a pesar de las políticas para mejorar la separación de residuos orgánicos en la fuente, los residuos sólidos municipales (RSM) aún contienen una alta proporción de residuos orgánicos. Estos desechos por lo general acaban en vertederos, lo que ha provocado una alta generación de costos económicos y ambientales significativos. Como metodología, adopta a la pirólisis como una tecnología alternativa para tratar la fracción de 10-40 mm de residuos orgánicos bioestabilizados (BSRW). Como resultados, se propone este método como una solución para reducir el volumen de residuos orgánicos en vertederos, transformándolos en recursos útiles como biochar y gas de síntesis. Además, en los balances de masa y energía se ha demostrado que la pirólisis puede ser energéticamente sostenible al producir biochar que representa entre el 30% y el 50% de la masa de BSRW. Sin embargo, la presencia de impurezas ha provocado limitaciones en la aplicación de este tipo de carbón vegetal.

Para el manejo de los neumáticos fuera de uso (NFU), el autor Afash et al. (2023), en la revista sostenibilidad, lo ha representado como un desafío significativo debido a su volumen,

durabilidad y propiedades peligrosas. La disposición inadecuada de estos neumáticos puede generar graves problemas ambientales y de salud pública. Como metodología se utiliza un enfoque cuantitativo para la recolección de datos primarios en el sitio, además, se incluye mediciones y lecturas en cada etapa del proceso. Como propuesta de la investigación es la evaluación de la viabilidad de la pirólisis, como una técnica sostenible para la gestión de NFU, en otros términos, se basa únicamente en la producción de aceite pirolítico (TPO) como un combustible alternativo. Se examinan factores como la temperatura, el período de residencia y la capacidad del reactor con el objetivo de maximizar la producción y disminuir el efecto en el medio ambiente. Como resultado, se establece una producción máxima de 45.6% de aceite a una temperatura óptima de 500 °C y se destaca la necesidad de realizar análisis ambientales detallados en reactores a escala industrial para asegurar la sostenibilidad del proceso de pirólisis como estrategia de gestión de residuos de neumáticos.

En el artículo de Blanchard & Mekonnen (2024) publicado en la revista polímeros aplicados RSC, menciona el principal desafío de la gestión de desechos plásticos. Resalta la falta de una solución eficaz y subraya la importancia de una estrategia holística que fusiona técnicas mecánicas y químicas para manejar estos desechos. Se propone como método la producción de carbón activado (AC) de alta superficie a partir de diferentes fuentes plásticas, como poliésteres, poliolefinas y resinas termoestables que no son reciclables. Se ejecutan procesos de carbonización y activación química para producir AC con superficies superiores a 2000 m<sup>2</sup>/g en algunos casos. Además, se sugiere el uso de la carbonización y activación química como técnicas para valorar desechos plásticos, convirtiendo estos en productos de alto valor carbonoso, como el carbón activado. Estos productos pueden ser utilizados para la adsorción de los contaminantes que son emergentes. Los materiales de AC son obtenidos del mismo plástico que exhiben un potencial significativo, con superficies particulares que exceden los 2000 m<sup>2</sup>/g. Como conclusión, se destaca el comportamiento adsorbente de estos AC frente a contaminantes como tintes y CO<sub>2</sub>, así como micro y nano plásticos.

Para el autor Wang et al. (2024) en la revista ciencias de la ingeniería química, hace referencia al creciente problema de los desechos provenientes de recipientes multicapa, como los cartones de bebidas, que constituyen una porción considerable de los desechos sólidos en las zonas urbanas. El manejo inadecuado de estos residuos, especialmente en países como China, donde apenas el 20% del cartón reciclado indica importantes desafíos medioambientales. La investigación comprende un estudio termo cinético mediante el análisis termogravimétrico (TG) y la cromatografía de gases relacionada con la espectrometría de

masas (GC-MS), con la finalidad de analizar la pirólisis de residuos de contenedores multicapa en una atmósfera de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Como propuesta, se plantea que una pirólisis atmosférica sea utilizada como alternativa de transformación de productos como son los ácidos acéticos y recuperación de proporciones de aluminio, a partir de tres etapas, que son: deshidratación, descomposición del material y eliminación de productos volátiles. Como resultado se obtiene una fuente de energía (EA) con un rango de conversión de 0,1 a 0,6 de un promedio de 123,6 kJ/mol a un aumento de 233,3 kJ/mol.

El artículo de Cuevas et al. (2024) publicado en la revista energía, explica sobre la creciente demanda de energía y la disminución de los combustibles fósiles tradicionales, que contribuyen significativamente a problemas ambientales como el cambio climático. Además, recalca el impacto negativo de los residuos plásticos en el medio ambiente, de forma especial en los vertederos y océanos, provocando su lenta contaminación y descomposición. Además, la revisión de documentación sobre la pirólisis lo señala como un proceso termoquímico que inicia con la descomposición del residuo con la ausencia del oxígeno, por reactores de producción por lotes o continua, esto se presenta como una forma de gestión de los residuos de manera prometedora y la generación de energía eco amigable. Como propuesta de la investigación se establece un flujo de trabajo experimental, en donde se destaca la importancia de la selección adecuada de los reactores y las condiciones operativas para mejorar la eficiencia y el rendimiento. Esta técnica permite la producción de gases con un alto valor calorífico y líquidos en donde su composición varía según el tipo de polietileno que se ha utilizado.

## **1.2. Estado del arte**

Para Baena et al. (2020), el estado del arte se refiere a un análisis completo de diferentes fuentes bibliográficas en donde se trata de gestionar conceptos variados. Esto permite identificar las diferentes propuestas teóricas, metodologías aplicadas, niveles de desarrollo alcanzados, explicando vacíos y evitando caer en contradicciones, aplicando todo esto para mayor facilidad del lector, por lo tanto, se lo considera como un proceso de desarrollo investigativo haciendo uso de bases teóricas y científicas sólidas.

En relación con el trabajo de investigación, el uso de esta herramienta tiene un resultado muy útil para la comprensión de las variables de estudio de una forma organizada, por ese motivo la revisión de documentos acerca de los diversos métodos pirolíticos, han demostrado ser prácticos para la conversión de lodos residuales en energía, y también otro tipo de residuos industriales.

Se realiza una revisión bibliométrica para la obtención de la documentación necesario, para conocer términos como: campo científico, métodos pirolíticos en residuos industriales y todo lo que esté vinculado a reutilizarse y crear fuentes de energía. Este tipo de herramientas de análisis de redes como Vosviewer ayuda a saber la forma de utilización por parte de los autores para el desarrollo de las investigaciones.

Asimismo, una toma de decisiones multicriterio MCDM tienen como objetivo otorgar un enfoque estructurado para evaluar y comparar entre sí las alternativas diversas basadas en múltiples criterios, considerando las compensaciones entre objetivos opuestos. Además de las preferencias y prioridades de los interesados. En este estudio en particular, se identifican estrategias óptimas equilibrantes en la eficiencia energética, el impacto ambiental y la viabilidad económica (Rachman et al., 2024).

Posteriormente, se obtienen resultados óptimos adoptados mediante un proceso de jerarquías analíticas AHP descrito como una técnica ampliamente utilizada en diversos enfoques de problemas de toma de decisiones multicriterio. Este tipo de proceso permite la descomposición de un problema complejo en una jerarquía de criterios y alternativas. En este análisis, tales procesos, metodologías y elementos son evaluados y comparados, usando el mejor calificado para realizar este ejercicio de investigación.

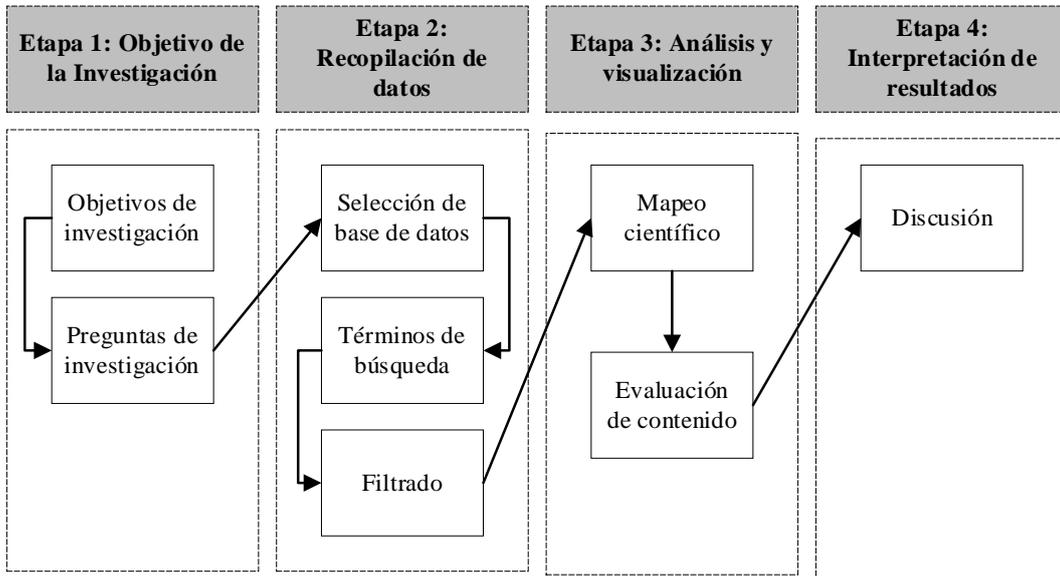
### **1.2.1. Revisión bibliométrica.**

Se comprende a la bibliometría como un estudio del análisis de información que se ha publicado y de su metaanálisis que están relacionados, como las citas, las palabras claves o los resúmenes (Ninkov et al., 2022). También se indica las respectivas suposiciones de la producción científica con relación al campo de publicación tema de investigación, ya que esto permite el seguimiento de la trayectoria de la información y conocer las características de cada uno de los documentos obtenidos (Linnenluecke et al., 2020).

Es por esto mismo, que se desarrolla un procedimiento de revisión bibliométrica en base al autor Öztürk et al., (2024) y Ninkov et al., (2022) que indica una serie de etapas como se observa en la figura 1.

**Figura 1.**

*Procedimiento de revisión bibliométrica.*



Nota: Elaborado por el autor en base a Öztürk et al., (2024) y Ninkov et al., (2022).

Con el desarrollo del procedimiento, se identifica una secuencia para una mayor organización de la información obtenidas a partir de los documentos seleccionados para el análisis bibliométrico, y así obtener una mejor comprensión del lector sobre el diseño de un método pirolítico para el reciclaje de residuos industrial para el uso como fuente de energía.

A continuación, se enlista la secuencia para el desarrollo del estado del arte, de la siguiente forma:

- a) Determinación de objetivos de investigación.
- b) Elaboración de preguntas de investigación.
- c) Selección de base de datos.
- d) Establecimiento de criterios de búsqueda.
- e) Filtrado de información obtenida.
- f) Extracción de los datos más relevantes.
- g) Mapeo científico.
- h) Evaluación de contenido.
- i) Discusión.

## Etapa 1: Objetivo de investigación.

### a) Determinación de objetivos de investigación.

Para la revisión bibliométrica se establece 3 objetivos de investigación que permitan alcanzar los resultados esperados por el investigador como se detalla a continuación:

**OB1:** identificar las tendencias y evolución del campo científico relacionado con el diseño de métodos pirolíticos para el reciclaje de residuos industriales como fuente de energía publicados en los últimos años.

**OB2:** plantear un análisis bibliométrico con el uso de vosviewer para el mapeo de tendencias claves que están relacionados con el tema de estudio.

**OB3:** recopilar y analizar las técnicas e instrumentos utilizados en los estudios revisados, con el fin de establecer un marco metodológico para el diseño de métodos pirolíticos aplicables al reciclaje de residuos industriales.

### b) Elaboración de preguntas de investigación.

Para la obtención de la información, este es agrupado en cuatro interrogantes principales para el cumplimiento de los objetivos definidos para la revisión bibliométrica. Mientras que su contenido está orientado en el aseguramiento de la información relevante al tema de estudio. Además, se identificaron los aspectos operativos que servirán de guía para el logro de dichos objetivos, facilitando la obtención de resultados precisos y relevantes.

La tabla 2, presenta las preguntas de investigación realizadas para mayor entendimiento de los objetivos asignados.

**Tabla 2.**

*Preguntas de investigación para revisión bibliométrica.*

Nº	Preguntas de investigación	Objetivo
P.1.	¿Cuál es la cantidad de publicaciones de los artículos seleccionados al tema de estudio en el periodo establecido?	OB.1.
P.2.	¿Qué resalta el campo científico en base a los artículos seleccionados sobre los métodos pirolíticos?	OB.2.
P.3.	¿Cuáles son las técnicas utilizadas para el desarrollo de los estudios de pirólisis de distintos residuos?	OB.3.
P.4.	¿Qué instrumentos son mencionados en la elaboración de las investigaciones indicadas?	

Nota: Elaborado por el autor.

Cada una de las preguntas establecidas se relaciona con un objetivo de investigación para especificar los resultados necesarios en cada uno de ellos.

**OB1.** Identificar las tendencias y evolución del campo científico relacionado con el diseño de métodos pirolíticos para el reciclaje de residuos industriales como fuente de energía publicados en los últimos años.

**P.1. ¿Cuál es la cantidad de publicaciones de los artículos seleccionados al tema de estudio en el periodo establecido?**

Para la pregunta 1, se determina sobre la cantidad de artículos publicados en el periodo de año establecido en la revisión bibliométrica en relación con los procesos pirolíticos y en el reciclaje de residuos industriales, esto permite que se visualice la tendencia de publicación, así demostrando el interés de los investigadores sobre esta área en específico, es decir, de cómo este tema tiene mayor importancia al ser estudiado con distintas propuestas.

**OB2.** Plantear un análisis bibliométrico con el uso de vosviewer para el mapeo de tendencias claves que están relacionados con el tema de estudio.

**P.2. ¿Qué resalta el campo científico en base a los artículos seleccionados sobre los métodos pirolíticos?**

En la pregunta 2, busca los distintos patrones que pueden revelar los artículos seleccionados por la revisión bibliométrica con su relación a los procedimientos pirolíticos planteados por los autores de los estudios. A través de la herramienta Vosviewer, uno puede rastrear las redes de colaboración entre los autores, determinando las referencias más comunes, y las palabras claves más importantes en esta área de estudio. Precisamente, se factoriza las conexiones entre los científicos, determinando los problemas más analizados y la vez señala los campos más importantes científicamente, permitiendo un entendimiento más detallado de cómo se estructura y se expande el saber acerca de los métodos pirolíticos.

**OB3.** Recopilar y analizar las técnicas e instrumentos utilizados en los estudios revisados, con el fin de establecer un marco metodológico para el diseño de métodos pirolíticos aplicables al reciclaje de residuos industriales.

**P.3. ¿Cuáles son las técnicas utilizadas para el desarrollo de los estudios de pirólisis de distintos residuos?**

En relación con la pregunta 3, se busca la identificación de las distintas técnicas que se utilizan para los procesos de reciclaje de residuos industriales como fuente de energía, además de distintos métodos para verificar el correcto proceso pirolítico, a partir de los artículos que han sido seleccionados en el proceso de revisión bibliométrica, esto permite la asignación de la técnica que reciba mejor calificación para su aplicación en el tema de investigación.

**P.4.: ¿Qué instrumentos son mencionados en la elaboración de las investigaciones indicadas?**

Acercas de la pregunta 4, se detectan cada una de las herramientas e instrumentos utilizados por los autores en el desarrollo de las investigaciones sobre la pirólisis de los desechos, esto con el fin de comprender sobre la relación de ser utilizados para un eficiente método de conversión a fuente de energía. Esto posibilita establecer un marco metodológico definido, que funcione como orientación en la creación de nuevos procedimientos pirolíticos. Además, proporciona datos relevantes acerca de las habilidades y restricciones técnicas de los aparatos utilizados en el área de estudio.

**Etapa 2: Recolección de datos.**

**c) Selección de base de datos.**

La revisión bibliométrica se diferencia por el uso de base de datos para la selección de información sobre el campo científica de preferencia, por esto mismo se determinan tres bases de datos para la obtención de hallazgos con una mayor relevancia para el trabajo de investigación.

**Tabla 3.**

*Selección de base de datos.*

<b>Base de Datos</b>	<b>Criterio</b>
<b>Scopus</b>	Ofrece herramientas para el análisis de citas.
<b>Web of Science</b>	Utilizado para el desarrollo de análisis bibliométricos profundos
<b>Dimensions</b>	Amplia variedad de contenido para análisis más amplios.

---

Nota: Elaborado por el autor.

En base a la tabla 3, se menciona sobre la elección de las bases de datos para la investigación para el análisis bibliométrico. Donde se selecciona Scopus por sus herramientas avanzadas para el análisis de citas, que ayudan a evaluar el grado de relevancia de los estudios en el campo de la pirólisis. A su vez, Web of Science se selecciona para realizar un mayor análisis bibliométrico con el fin de obtener una mayor comprensión de las tendencias académicas. Finalmente, Dimensions se utiliza para una mayor variedad de contenido, lo que permite un enfoque más integral al análisis del tema debido a sus estudios más recientes y emergentes.

#### d) Establecimiento de criterios de búsqueda.

Con la determinación de las bases de datos, se utilizan filtros para la definición de los parámetros, que permiten la búsqueda de los documentos seleccionados para el estado del arte. Esto tiene como finalidad, que esta etapa se garantice con la búsqueda de forma clara y eficiente, debido que, los resultados obtenidos sean relevantes para el tema de estudio, optimizando así la calidad de la revisión.

**Tabla 4.**

*Criterios de búsqueda de publicaciones.*

Filtro	Criterio
Año de publicación	Documentos publicados en los últimos 5 años (2020 a 2024).
Tipo de documento	Artículos de investigación publicados en revistas científicas.
Campo	Ingeniería, ciencias ambientales, ciencia de los materiales e ingeniería química.
Palabras claves	Método pirolítico AND reciclaje de residuos AND fuentes de energía.
Acceso	Todo acceso abierto.

Nota: Elaborado por el autor.

La tabla 4, se centra en los criterios de búsqueda de la literatura científica trascendental. En este caso, los campos anteriores se pueden evaluar mediante el contenido que se haya publicado recientemente. Los documentos anteriores a 2020 no se consideraron válidos para este trabajo, y el actualizado hasta 2024. El uso de la literatura publicada solo en revistas científicas está destinado a garantizar la fiabilidad y la importancia del contenido. En palabras sencillas, la ingeniería, las ciencias ambientales, ciencia de los materiales e ingeniería química serán áreas de enfoque para alinearse con el tema. Se utiliza como palabras claves mediante símbolo booleano que son: método pirolítico AND reciclaje de residuos AND fuentes de energía, para una búsqueda exacta, además se limita a estudios de acceso abierto para facilitar la visualización del contenido completo.

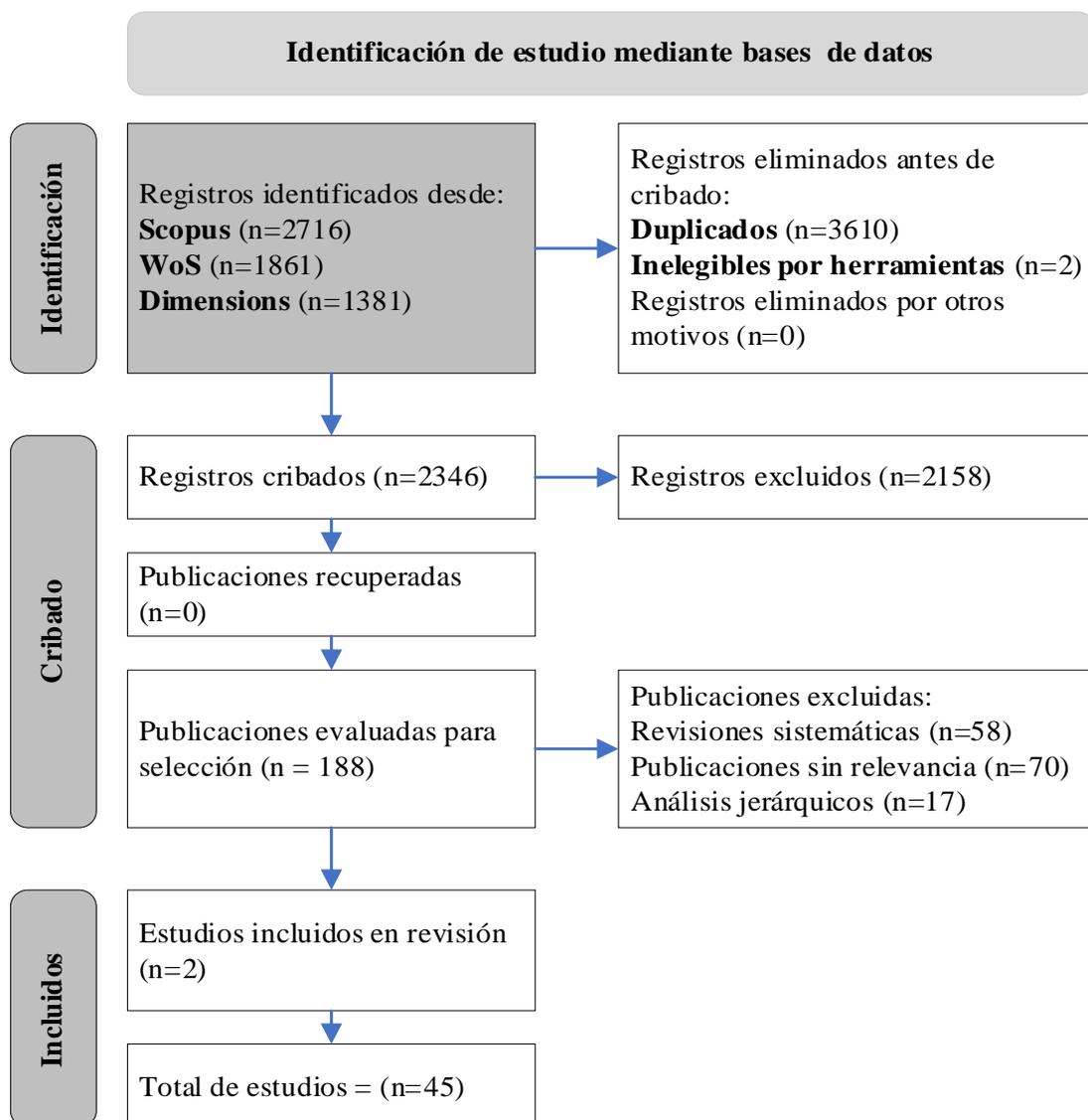
#### e) Filtrado de información obtenida.

En el proceso de filtración de artículos, se tiene en cuenta la declaración PRISMA 2020, en donde se garantiza que el proceso sea transparente durante la selección. Se representa que en la figura 2, se describe las etapas como: la identificación, el cribado y la inclusión de los

artículos en donde se obtiene un total de 2,716 fuentes de Scopus, 1,861 para Web of Science y de 1,381 obtenidos de Dimensions. Después de la revisión, se han omitido 3,610 registros duplicados y 2 registros inelegibles, demostrando 2,346 registros que serán revisados en la etapa siguiente para el cribado. Para la fase de cribado, se han omitido 2,158 registros por falta de relevancia, dejando 188 publicaciones para la selección. De ellas, se omite un total de 58 revisiones sistemáticas, 70 publicaciones no relacionados al tema, y de 17 análisis jerárquicos. Como último, se han incluido 2 artículos por el método bola de nieve, en total se obtienen 45 artículos con relación al tema de investigación como se muestra la figura 2.

**Figura 2.**

*Proceso de selección de publicaciones.*



Nota: Elaborado por el autor.

### Etapa 3: Análisis y visualización.

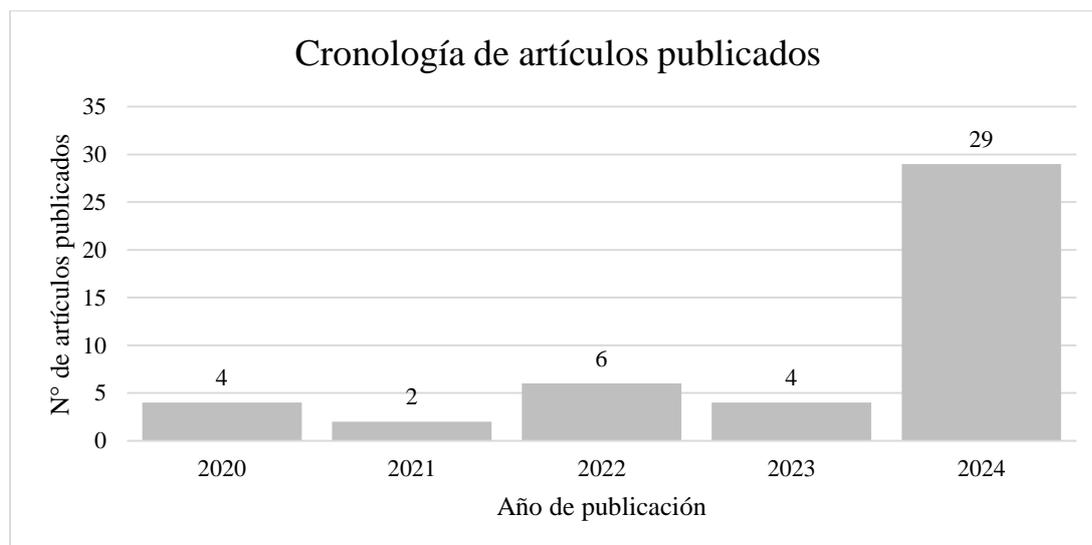
#### f) Mapeo científico.

**RQ1. ¿Cuál es la línea de tiempo de publicación de los artículos seleccionados sobre el diseño de un método pirolítico para el reciclaje de residuos industriales?**

Según los resultados observados, se puede verificar la variabilidad de años de los artículos científicos. El año que más destaque fue el 2024, con un total de 29 artículos, siendo estos A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10, A11, A12, A13, A14, A15, A16, A17, A18, A31, A32, A33, A34, A35, A36, A37, A40, A41, A44, A45, así se considera el periodo con mayor número de publicaciones. Le sigue 2022, donde se documentaron 6 artículos con A21, A22, A23, A24, A25 y A42. En tercer lugar, se encuentra 2020 donde se registraron 4 artículos perteneciendo a A28, A29, A30 y A43, en el 2021 (A26 y A27) y 2023 (A19, A20, A38 y A39).

#### Figura 3.

*Cronología de los artículos publicados.*



Nota: Elaborado por el autor.

En la figura 3, el estudio de la distribución temporal de los artículos publicados ofrece una visión de la evolución de la investigación en el área a lo largo de los años. Resulta particularmente destacable el incremento en el número de publicaciones en 2024, evidenciando un fuerte interés en las variables analizadas.

**RQ2. ¿Cuáles son los principales patrones en los artículos seleccionados sobre los métodos pirolíticos?**

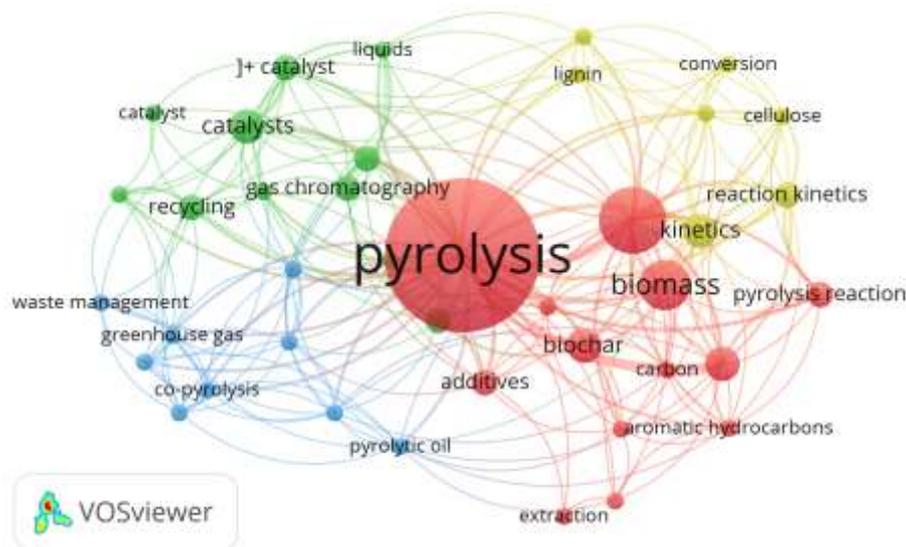
Para responder a la pregunta, se desarrolla los análisis bibliométricos que permitan una visión coherente sobre el campo de estudio que son: mapeo de coocurrencia, el análisis de

citaciones por autores, de revistas o fuentes, una red de colaboración entre autores y un análisis de citación de documentos.

- **Mapeo de coocurrencia.**

#### **Figura 4.**

*Análisis de coocurrencia.*



Nota: Elaborado por el autor.

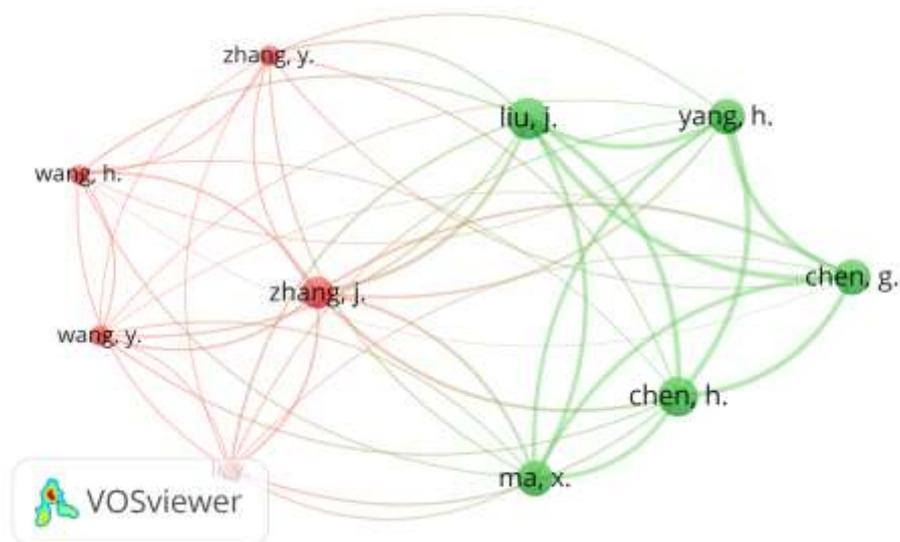
Se visualiza en la figura 4, la coocurrencia por Vosviewer, que se agrupa en 4 clústeres, en donde la sección en rojo está liderada por la palabra pirólisis y de 19 coocurrencias como es energía de activación, el biocarbón y análisis termogravimétrico. Mientras que en el grupo de color azul tiene palabras relaciones de los combustibles como: aceite pirolítico, gas pirolítico y de gases de efecto invernadero, lo que indica que los artículos presentan una relación a la generación de combustibles. Por otro lado, en el apartado de figuras de color verde resaltan técnicas e instrumentos como catalizadores, cromatografía de gases y espectrometría de masas, por lo tanto, se resaltan que los artículos existen una variedad de herramientas en el uso de la investigación. Como último, para la sección de color amarillo tienden ser palabras con relación a la composición de los lodos cartoneros como es la celulosa, lignina y factores como conversión y de las reacciones cinéticas que implican en los procesos pirolíticos.

- **Análisis de citaciones de autores**

Por medio de este análisis, se permite conocer a los investigadores más influyentes y en la comprensión de cómo sus trabajos están conectados con relación al tema de investigación sobre la pirólisis de residuos industriales como que sea utilizada como fuente de energía.

## Figura 5.

*Análisis de citas por autores.*



Nota: Elaborado por el autor.

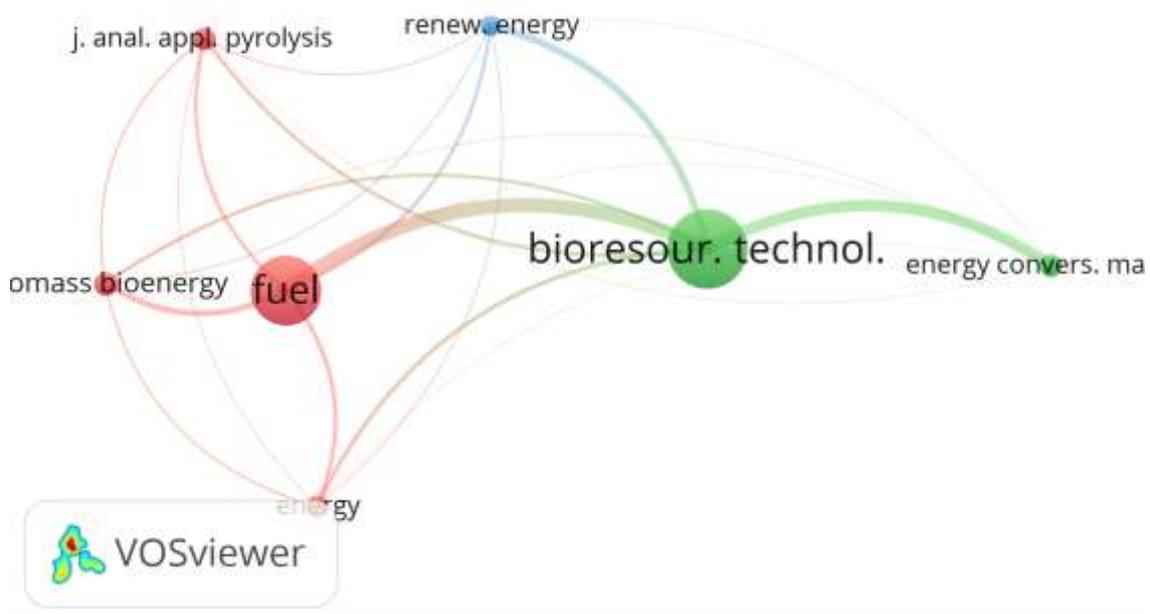
Basado en la figura 5, el análisis de las citas de los autores revela la estructura de la influencia académica en el campo de estudio, identificando dos clústeres principales. Se identifica que en el primer grupo (figuras rojas), hay un total de 5 autores que tienen un total de 45 conexiones, como es el autor Zhang con un total de 21 citaciones, lo que indica una alta influencia en las investigaciones de pirólisis. Por otro lado, en el segundo grupo, se resalta al autor Liu que contiene investigaciones con un total de 24 citas, lo que resulta en una alta relación para la literatura del tema de estudio, además de otorgar un amplio contenido como contribución que el campo de los sistemas de reducción de residuos generado de distintas industrias. En resumen, estos resultados ilustran la presencia de los clústeres de conocimiento y destacan ciertos autores que han llevado el campo hacia la dirección actual.

- ***Análisis de citación de fuentes.***

Este análisis tiene como enfoque a las referencias o revistas que han sido citadas de manera conjunta en los artículos, lo que permite identificar los estudios fundamentales que han influido en la literatura reciente sobre el tema.

**Figura 6.**

*Análisis de citación de fuentes o revistas.*



Nota: Elaborado por el autor.

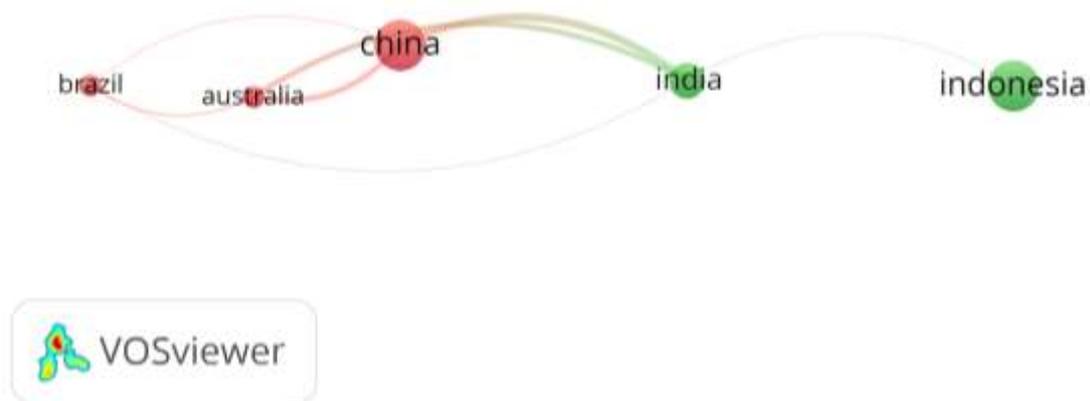
En la figura 6, el análisis de citación de referencias demuestra qué fuentes son fundamentales para la literatura sobre métodos pirolíticos de reciclaje de residuos industriales. Para el primer clúster rojo, la más importante es el combustible, ya que es un líder con 6 conexiones y 68 citas, lo que indica su importancia para el estudio de la combustión y los procesos termoquímicos. También incluye tres revistas relacionadas con la energía, con los términos bioenergía de biomasa y pirólisis analítica que presentan el análisis y uso de energía del proceso de pirólisis. El segundo clúster azul se visualiza la tecnología de biorrecursos como protagonista, con 6 conexiones y 77 referencias, lo que confirma el papel del artículo en la conversión de residuos en recursos valiosos. Además, se establece la conversión y gestión de energía, lo que confirma el foco en la eficiencia energética. El tercer clúster amarillo es energía renovable con una relevancia considerable de 6 conexiones y 20 citaciones.

- ***Red de colaboración entre países.***

Este tipo de análisis permite la visualización de la estructura de colaboración entre los países de los estudios seleccionados. Es decir, tiene como finalidad la identificación de los grupos de investigación que colaboran entre sí y redes de investigadores en el campo de la pirólisis.

**Figura 7.**

*Red de colaboración de países.*



Nota: Elaborado por el autor.

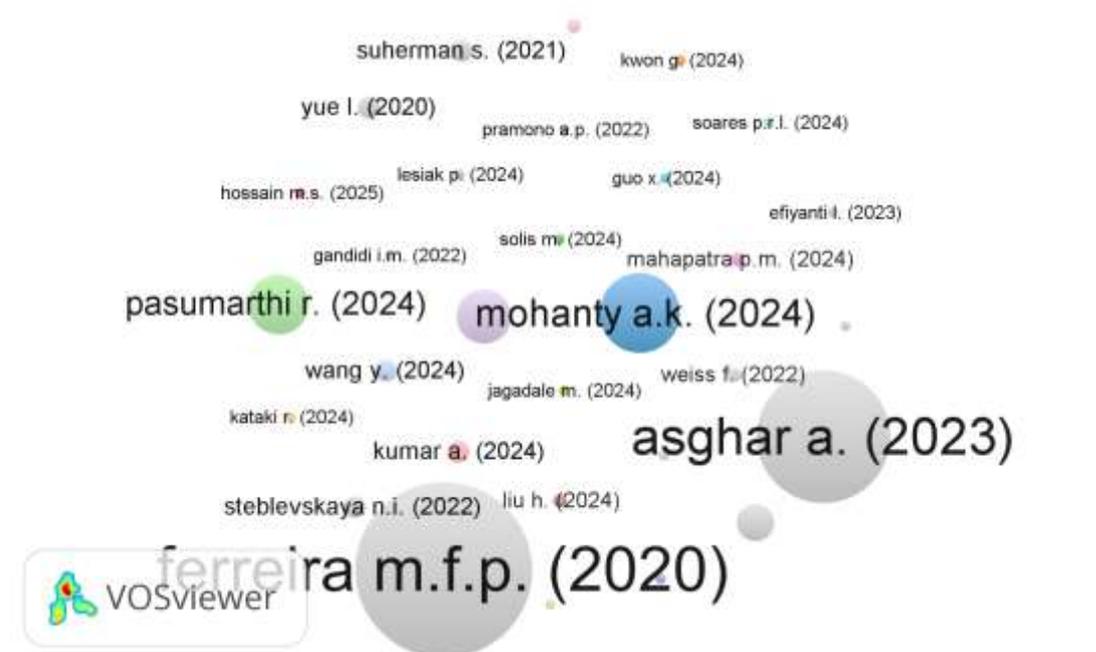
Por parte de la figura 7, donde se observa los resultados del análisis bibliométrico de las redes de cooperación entre países, en donde se resalta dos principales clústeres que involucra en el primer grupo a China con el aporte de 7 artículos, que implica que tiene una posición central en el desarrollo de investigación acerca de los procesos pirolíticos para el reciclaje de los residuos generados en diferentes áreas de la industria, tanto a nivel nacional como internacional. Mientras que Australia y Brasil solo tienen una contribución de 3 documentos, es decir, que mantiene un nivel de contribución medio a nivel global. Dentro del segundo grupo, están los países de India que tiene una cooperación directa con China con la elaboración de 5 artículos de investigación, mientras que Indonesia mantiene una conexión directa solo con la India con un total de 7 documentos, esto aclara que la producción científica en la región asiática es alta, provocando que estas nuevas tecnologías tengan una mayor aplicación dentro de estos países.

- ***Análisis de citación de artículos.***

Se selecciona este tipo de análisis con la selección de los 45 artículos a partir de la revisión bibliométrica, esto implica a los artículos con una mayor influencia dentro de futuros estudios por su amplia relación al campo de estudio, esto se visualiza en la figura 8.

## Figura 8.

*Análisis de citación de artículos.*



Nota: Elaborado por el autor.

En este análisis se resalta al artículo de Ferreira (2020) que implica la colaboración con el campo científico, debido a su investigación tiene la mayor cantidad de citaciones con un total de 37, mientras que Asghar (2023) está en segundo puesto con un total de 25 citas por lo que también contiene una alta influencia sobre los temas de procesos pirolíticos. Mohanty & Kumar (2024) junto con Pasumarthi (2024) se destacaron como las publicaciones con más citas el año pasado, con 12 y 8 citas, respectivamente, lo que evidencia el desarrollo constante y el interés en la investigación en este tema. Como último, los restantes contienen una cantidad menor a 8 citas, por lo que resulta una influencia inferior, pero en ciertos casos es por su temprana aportación, es decir, su publicación es reciente, sin embargo, esto tiene un aporte en la formación de los procesos pirolíticos actuales.

### **RQ3. ¿Cuáles son los métodos más utilizados en los estudios sobre la pirólisis de residuos?**

Con los artículos obtenidos de la revisión bibliométrica, se identifica las técnicas utilizadas de cada uno y luego son agrupados, se considera la posible utilización de más de una técnica por artículo, por lo tanto, resalta la frecuencia de uso de cada elemento.

**Tabla 5.***Identificación de técnicas utilizadas por los artículos.*

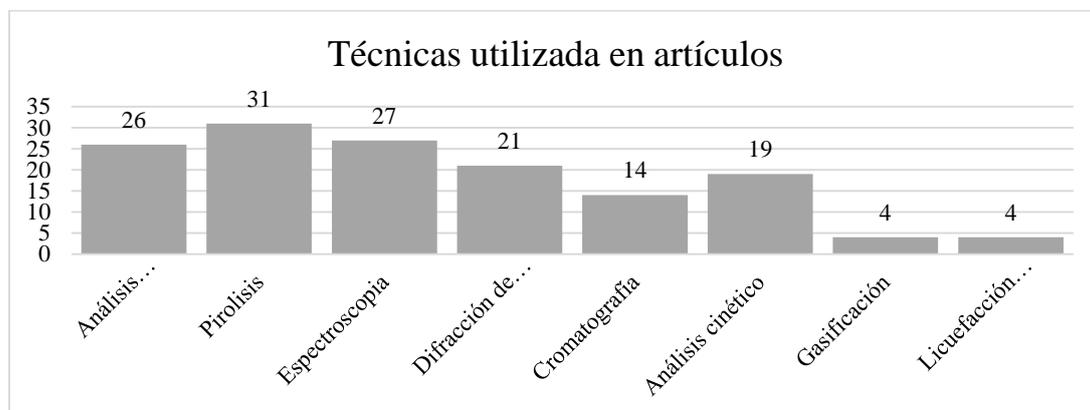
<b>Técnicas</b>	<b>F</b>	<b>Artículos</b>
<b>Análisis termogravimétrico</b>	26	A2, A4, A5, A6, A9, A10, A11, A12, A13, A15, A16, A19, A20, A24, A28, A30, A31, A33, A35, A39, A40, A41, A42, A43, A44, A45.
<b>Pirólisis</b>	31	A1, A2, A3, A4, A5, A7, A8, A9, A10, A11, A12, A13, A14, A15, A17, A18, A19, A20, A21, A22, A23, A24, A25, A26, A27, A28, A29, A37, A39, A41, A43.
<b>Espectroscopia</b>	27	A1, A2, A4, A8, A9, A11, A16, A18, A19, A21, A22, A23, A27, A28, A30, A31, A32, A33, A34, A35, A36, A38, A39, A41.
<b>Difracción de rayos X (XRD)</b>	21	A4, A15, A19, A23, A32, A34, A35, A40, A42, A44, A45.
<b>Cromatografía</b>	14	A1, A2, A4, A6, A13, A15, A18, A20, A24, A25, A28, A38, A42.
<b>Análisis cinético</b>	19	A1, A3, A5, A7, A8, A9, A10, A14, A19, A20, A21, A22, A23, A25, A26, A27, A29, A37, A41.
<b>Gasificación</b>	4	A10, A13, A14, A17.
<b>Licuefacción hidrotermal</b>	4	A3, A7, A12, A17.

Nota: Elaborado por el autor.

A partir de la tabla 5, indica que las técnicas de los artículos se han empleado para su procedimiento de investigación, que se sitúa en los métodos pirolíticos de forma principal con 31 artículos, que son utilizados para la reducción de residuos, además, se encuentra el análisis termogravimétrico y la espectroscopia donde 26 a 27 artículos se han manejado como una forma de demostración de la eficiencia sobre la propuesta y como se caracteriza el material resultante, en sí, como actúa las propiedades térmicas. Por otro lado, está la cromatografía que se ha aplicado a un total de 14 investigaciones que es dirigido a la composición de los procesos pirolíticos y a la difracción de rayos X con un total de 21 aplicaciones. Esto se añade al grupo de instrumentos para evaluar la eficacia y características de los procesos de pirólisis. Estos hallazgos demuestran la extensa variedad de métodos utilizados, subrayando la relevancia de técnicas sofisticadas para un entendimiento detallado de los procesos pirolíticos, tal como se muestra en la figura 9.

**Figura 9.**

*Diagrama de técnicas utilizadas de artículos.*



Nota: Elaborado por el autor.

Con las técnicas determinadas, son evaluadas a través de un proceso jerárquico analítico (AHP) para seleccionar la técnica que pueda utilizar el trabajo de investigación, por lo que se puede visualizar en la figura 9.

**Figura 10.**

*Elementos de AHP (técnicas).*

Objetivo de investigación	Técnicas	Símbolo
Recopilar y analizar las técnicas e instrumentos utilizados en los estudios revisados, con el fin de establecer un marco metodológico para el diseño de métodos pirolíticos aplicables al reciclaje de residuos industriales.	Análisis termogravimétrico	AT
	Pirolysis	PL
	Espectroscopia	ES
	Difracción de rayos X (XRD)	XRD
	Cromatografía	CG
	Análisis cinético	AC
	Gasificación	GS
	Licuefacción hidrotermal	LH

Nota: Elaborado por el autor.

Con el uso de AHP, se consigue una mejor toma de decisiones consideradas como complejas, esto por el uso de criterios y de alternativas que son evaluadas en base a los criterios

del investigador, que asigna puntuaciones a cada una de las técnicas para su respectivo cálculo, que permite una secuencia de ponderaciones que son clasificados por influencia al estudio (anexo A). Esto con el fin de seleccionar los elementos que consigan una eficiente elaboración del método pirolítico y de los cumplimientos de los objetivos planteados. Con las valoraciones determinadas se realiza la ponderación de cada una de las técnicas como se observa en la tabla 6.

**Tabla 6.**  
*Desarrollo de matriz ponderada.*

<b>Métodos</b>	<b>Matriz Ponderada</b>								
<b>AT</b>	0.0728	0.1339	0.0714	0.0625	0.1184	0.0286	0.1786	0.1667	
<b>PL</b>	0.2184	0.4018	0.3571	0.3125	0.1974	0.6004	0.3214	0.3000	
<b>ES</b>	0.0728	0.0804	0.0714	0.0625	0.1184	0.0400	0.1071	0.1000	
<b>XRD</b>	0.0728	0.0804	0.0714	0.0625	0.1184	0.0286	0.1071	0.1000	
<b>CG</b>	0.0243	0.0804	0.0238	0.0208	0.0395	0.0222	0.0357	0.1000	
<b>AC</b>	0.5097	0.1339	0.3571	0.4375	0.3553	0.2001	0.1786	0.1667	
<b>GS</b>	0.0146	0.0446	0.0238	0.0208	0.0395	0.0400	0.0357	0.0333	
<b>LH</b>	0.0146	0.0446	0.0238	0.0208	0.0132	0.0400	0.0357	0.0333	

Nota: Elaborado por el autor.

Con la elaboración de la tabla 7, se consigue que la pirólisis (PL) y el análisis termogravimétrico (AT) se consideren como influyente para el estudio a desarrollar, por el hecho que, (PL) obtuvo una alta calificación que lo sitúa en el primer puesto con 24.91% por amplia relevancia en la degradación de la materia por un proceso termoquímico del material que es utilizado como producto energético. Se le sigue con un 24.45% al análisis termogravimétrico (AT), que determina la estabilidad térmica de los materiales estudiados y en la evaluación de sus características de descomposición. Estas dos técnicas sobrepasa a las demás alternativas evaluadas, tales como es el análisis cinético (AC) con un porcentaje del 22.02% y la espectroscopia (ES) con un 9.57%. Con la selección de PL y AT ya indicado su alta relevancia y su capacidad para la proporción de la información con relación a los procesos térmicos involucrados en la investigación, lo que se convierte en técnicas más adecuadas al estudio.

**Tabla 7.**  
*Resultados obtenidos AHP (técnicas).*

Técnicas	Sumatoria	Ponderación	%	Calificación
AT	1.9560	0.2445	24.45%	2
PL	1.9926	0.2491	24.91%	1
ES	0.7657	0.0957	9.57%	4
XRD	0.6142	0.0768	7.68%	5
CG	0.4314	0.0539	5.39%	6
AC	1.7618	0.2202	22.02%	3
GS	0.3146	0.0393	3.93%	7
LH	0.1638	0.0205	2.05%	8

Nota: Elaborado por el autor.

En la observación de la tabla 8, se obtiene que los resultados demostrados en la consistencia tienen una razón del 0,09, por la cual se evidencia que al ser menor que 0.1 es considerada como una evaluación coherente para la respectiva toma de decisiones. También se constató que el  $\lambda_{max}$  calculado es de 9,002, determinando que detalla una consistencia dentro de la matriz de ponderaciones con las técnicas implicadas. Como último, se tiene que el índice de consistencia es de 0,143 obtenido por el aleatorio de 1,45 que otorga el método AHP. Por lo cual, todo esto resalta una confianza en la selección de la técnica con mayor influencia dentro del proceso analítico.

**Tabla 8.**  
*Cálculo de consistencia (AHP técnicas).*

$\lambda_{max}$	9.002514925
Índice de consistencia	0.143216418
Índice de consistencia aleatorio	1.45
Razón de consistencia	0.099
Válido	ACEPTABLE

Nota: Elaborado por el autor.

Por lo tanto, se evidencia el uso de las técnicas de pirólisis (PL) y del análisis termogravimétrico (AT) para su implementación en el trabajo de investigación.

#### **P.4. ¿Cuáles fueron los instrumentos que han sido implementadas en las investigaciones?**

Como resolución de la siguiente pregunta, se realiza el análisis de los instrumentos utilizados en los artículos seleccionados, en donde se evidencia una gran cantidad de herramientas que han sido aplicadas en la investigación en relación de los métodos pirolíticos como se observa en la tabla 9.

**Tabla 9.***Identificación de instrumentos utilizados en artículos.*

Nº	Instrumentos	F	Artículos
1	Equipos de laboratorio.	8	A1, A10, A22A34, A35, A37, A41, A43
2	Software de LCA.	1	A2
3	Herramientas de modelado.	1	A2
4	Modelado teórico y generación de bases de datos.	1	A3
5	Espectroscopía infrarroja (FTIR).	6	A3, A19, A28, A31, A32, A44
6	Analizador termogravimétrico.	14	A4, A5, A7, A9, A12, A13, A20, A24, A30, A31, A33, A42, A43, A45
7	Software de modelado cinético.	1	A5
8	Muestras de lutita.	1	A6
9	Tamices moleculares.	1	A8
10	Análisis de productos volátiles.	1	A8
11	Hornos.	1	A11
12	Flujo de nitrógeno.	1	A14
13	tasas de calentamiento.	1	A14
14	Microscopio electrónico.	9	A15, A19, A23, A34, A35, A36, A37, A39, A40
15	Columna C18.	1	A16
16	Catalizador.	2	A17, A24
17	Reactor.	3	A17, A21, A25
18	Analizador de propiedades físicas.	1	A28
19	GC-MS (Cromatografía de gases-espectrometría de masas)	6	A10, A18, A20, A27, A28, A29
20	HPTLC.	1	A16
21	PY-GC-MS.	1	A28
22	Microondas de laboratorio.	1	A29
23	Polvos metálicos.	1	A23
24	Pastas.	1	A26
25	Analizador de partículas.	1	A30
26	Difractómetro de rayos X.	2	A19, A30

Nota: Elaborado por el autor.

El analizador termogravimétrico fue el instrumento más utilizado, con 14 artículos utilizando un analizador termogravimétrico, lo que refleja su importancia en el estudio de la pirólisis de materiales. Con un total de tres artículos se evidenció el uso de reactores que son empleados en la cromatografía de gases (GC – MS), por otro lado, se mencionó que 6 artículos se utilizaron para la evaluación de los volátiles presentes en el material, además, se obtiene instrumentos como el espectroscopio FTIR y del microscopio electrónico que tiene una influencia normal por un total de 9 artículos que han sido aplicados con el fin de una observación a nivel molecular, como último están los modelos cinético y teóricos que tienen una sola aplicación. La variedad de instrumentos refleja la multiplicidad de enfoques y metodologías en el campo, ajustándose a las necesidades particulares de cada estudio.

**Figura 11.**

*Agrupación de instrumentos en técnicas (AHP instrumentos).*

Objetivo de investigación	Técnicas	Instrumentos	Símbolo
Recopilar y analizar las técnicas e instrumentos utilizados en los estudios revisados, con el fin de establecer un marco metodológico para el diseño de métodos pirolíticos aplicables al reciclaje de residuos industriales.	AT	Analizador termogravimétrico	AT1
		Flujo de nitrógeno	AT2
		Tasas de calentamiento	AT3
	PL	Equipos de laboratorio	PL1
		Microondas de laboratorio	PL2
		Hornos	PL3
		Muestras de lutita	PL4
		Polvos metálicos	PL5
		Pastas	PL6
		Reactor	PL7
	ES	Espectroscopía infrarroja (FTIR)	ES1
		Microscopio electrónico	ES2
		Analizador de partículas	ES3
	XRD	Difractómetro de Rayos X	XRD1
	CG	Cromatografía de gases-espectrometría de masas	CG1
		Columna C18	CG2
		PY-GC-MS	CG3
		Analizador de productos volátiles	CG4
	AC	Herramientas de modelado	AC1
		Modelado teórico y generación de bases de datos	AC2
		Software de modelado cinético	AC3
		Software de LCA	AC4
	GS	Tamices moleculares	GS1
Analizador de propiedades físicas		GS2	
LH	HPTLC	LH1	
	Catalizador	LH2	

Nota: Elaborado por el autor.

En la figura 11, se agrupan los instrumentos identificados en cada técnica que tiene relación a partir de la matriz referencial (tabla 11), esto permite que el proceso analítico jerárquico (AHP) se realice de forma eficiente y con mejores resultados, además se desprecia

XRD por el tener un instrumento, es decir, no es posible realizar los cálculos necesarios para esa técnica (anexo A).

**Tabla 10.**  
*Resultados obtenidos AHP (instrumentos).*

Método	Peso	Instrumento	Landa	CR	Peso Unitario	Peso Global	%	Posición
AT	0.244	AT1	3.055	0.048	0.440	0.108	10.77%	2
		AT2			0.235	0.057	5.75%	6
		AT3			0.325	0.079	7.93%	4
PL	0.249	PL1	8.875	0.237	0.444	0.111	11.06%	1
		PL2			0.200	0.050	4.99%	8
		PL3			0.134	0.033	3.33%	10
		PL4			0.074	0.018	1.85%	14
		PL5			0.074	0.018	1.85%	15
		PL6			0.044	0.011	1.11%	19
		PL7			0.029	0.007	0.72%	24
ES	0.095	ES1	3.177	0.152	0.048	0.005	0.46%	21
		ES2			0.238	0.023	2.28%	9
		ES3			0.286	0.027	2.73%	7
CG	0.053	CG1	5.735	0.642	0.388	0.021	2.09%	11
		CG2			0.304	0.016	1.64%	16
		CG3			0.179	0.010	0.97%	18
		CG4			0.129	0.007	0.70%	20
AC	0.220	AC1	6.154	0.798	0.558	0.123	12.29%	3
		AC2			0.263	0.058	5.80%	5
		AC3			0.122	0.027	2.68%	12
		AC4			0.057	0.013	1.25%	13
GS	0.039	GS1	0.571	0.000	0.048	0.002	0.19%	25
		GS2			0.238	0.009	0.94%	17
LH	0.020	LH1	0.659	0	0.226	0.005	0.46%	22
		LH2			0.060	0.001	0.12%	23

Nota: Elaborado por el autor.

En la tabla 10, se han calculado los pesos unitarios de cada instrumento identificado por su símbolo, se señala la razón de consistencia (CR) donde se resalta su validez en cada sección de instrumentos agrupados, se realiza su respectiva calificación a partir de un peso global, en donde el instrumento AC1 (modelo de simulación) tiene un porcentaje de 12.29% que lo pone en el primer puesto. Por otro lado, PL1 (pirólisis) se sitúa en el segundo puesto con un porcentaje del 11.06% y en tercer lugar se presenta a AT1 (analizador termogravimétrico) que tiene un porcentaje de 10.77%. Es decir, se determina que los tres instrumentos que se posicionan en los tres primeros lugares son los que se aplican para el desarrollo del trabajo de investigación.

**Tabla 11.***Matriz referencial de artículos de investigación.*

N°	Autor	Propuesta	Resultado	Técnicas	Instrumentos	Procedimiento
A1	(Hossain et al., 2024)	Evaluar las características de emisión y la combustión de motores utilizando residuos.	Las mezclas mostraron un rendimiento del motor mejorado, comparable al del diésel.	Pirólisis, análisis cinético, cromatografía, espectroscopia.	Equipos de laboratorio.	Preparación de muestras. Evaluación de rendimiento. Análisis de emisiones
A2	(Solis et al., 2024)	Investigar los impactos ambientales y socioeconómicos para una gestión sostenible de los residuos textiles.	Las intervenciones reducen los impactos del calentamiento global hasta en un 18% para 2035.	Pirólisis, análisis termogravimétrico, cromatografía, espectroscopia.	Software de LCA, herramientas de modelado.	Recopilación y evaluación de datos, modelado de flujos y evaluación de impactos ambientales
A3	(Mohanty et al., 2024)	Expandir aplicaciones de biocarbonos en polímeros, energía y medio ambiente para sustituir materiales basados en fósiles.	Evaluación crítica de la captura de carbono, reducción de residuos, impacto económico, sostenibilidad y circularidad de materiales.	Análisis cinético, pirólisis, licuefacción hidrotermal.	Modelado teórico y generación de bases de datos.	Conversión termoquímica a altas temperaturas (>350 °C) en ausencia o con oxígeno limitado.
A4	(Jagadale et al., 2024)	Evaluar las características de los compuestos volátiles liberados durante la pirólisis de los palos de yute.	Los alcoholes fueron identificados como los principales productos de la pirólisis.	Análisis termogravimétrico, pirólisis, cromatografía, espectroscopia, difracción de rayos X.	Analizador termogravimétrico, espectroscopia IR.	Preparación de muestras. Análisis termogravimétrico. Modelado cinético. Caracterización de productos.
A5	(Nath et al., 2024)	Estudiar dos tipos de pellets de paja de trigo (T1: 100% paja de trigo, T2: 70% paja de trigo con aditivos).	Los pellets con aditivos (T2) mostraron una mayor fracción degradable debido a una menor energía de activación ( $E_a$ ), sugiriendo un potencial.	Análisis termogravimétrico, pirólisis, análisis cinético.	Analizador termogravimétrico, software de modelado cinético.	Preparación de muestras. Análisis termogravimétrico. Modelado cinético.

N°	Autor	Propuesta	Resultado	Técnicas	Instrumentos	Procedimiento
A6	(Guo et al., 2024)	Determinar las características que influyen en la evolución de la generación de hidrocarburos.	La adición de pirita aumenta la producción de petróleo en un 33.9%.	Análisis termogravimétrico, simulación térmica, cromatografía.	Muestras de lutita de baja madurez y querógeno.	Experimentos de simulación térmica, análisis de composición isotópica.
A7	(Kwon et al., 2024)	Investigar la conversión termoquímica de nylon-6 y lodo rojo.	Se obtuvo un compuesto de carbono grafitico N-dopado con partículas de Fe0.	Pirólisis, análisis cinético, licuefacción hidrotermal.	Analizador termogravimétrico.	Experimentos de co-pirólisis, de activación de persulfato.
A8	(Liu et al., 2024)	Investigar los efectos de compuestos modificados con metales de transición y el comportamiento de la pirólisis.	La pirólisis de alcalinos alcanzó el mayor rendimiento de productos líquidos del 24.50 % a 600 °C.	Pirólisis, análisis cinético, espectroscopia.	Tamices moleculares, análisis de productos volátiles.	Modificación ácida y metálica de catalizadores, análisis cinético y termodinámico.
A9	(Mahapatra et al., 2024)	Examinar la cinética y el comportamiento de la pirólisis de paquetes de plástico.	El proceso de pirólisis dio como resultado una pérdida de peso y el análisis FTIR confirmó la presencia de diversos componentes hidrocarburos.	Análisis termogravimétrico, pirólisis, análisis cinético, espectroscopia.	Termogravimetría. Espectroscopía infrarroja.	Método de Kissinger-Akahira-Sunose (KAS). Método Flynn-Wall-Ozawa (FWO) Método de Kissinger.
A10	(Kumar et al., 2024)	Evaluar el potencial de residuos para la producción de bioenergía.	Mejora el contenido de carbono y reduce los niveles de oxígeno y nitrógeno, produciendo un combustible sólido limpio.	Análisis termogravimétrico, pirólisis, análisis cinético, gasificación.	Equipos de laboratorio, GC-MS.	Carbonización hidrotermal. Pirólisis. Co-pirólisis.
A11	(Pasumarthi et al., 2024)	Propone un método pirolítico para la producción de biochar en base a tallos de maíz.	El biochar elaborado en el horno portátil obtuvo un porcentaje de carbono más estable en comparación con el horno mufla.	Análisis termogravimétrico, pirólisis, espectroscopia.	Horno portátil y mufla.	Comparativa de la producción de biochar en distintas temperaturas implicadas.

N°	Autor	Propuesta	Resultado	Técnicas	Instrumentos	Procedimiento
A12	(Y. Wang et al., 2024)	Evaluar el potencial del uso de la cáscara de nuez para la conversión pirolítica en productos bioenergéticos.	Al evaluar el material obtuvo respuesta positiva acerca del uso bioenergético, con modelos cinéticos y de red neuronal artificial.	Análisis termogravimétrico, pirólisis, licuefacción hidrotermal.	Analizador termogravimétrico.	Modelos de mecanismos de nucleación, método de gráficos, modelos de mecanismos de reacción.
A13	(Ahmetli et al., 2024)	Investigar el potencial de recuperación de energía y materia prima a partir de la fracción fluida de la pirólisis.	Se obtuvieron compuestos recuperables los productos más estables térmicamente se formaron a temperaturas de pirólisis más altas.	Análisis químico, análisis termogravimétrico, cromatografía, gasificación.	Analizador termogravimétrico.	Pirólisis catalítico a temperaturas de 300–700 °C y dosis de catalizador del 10–50%.
A14	(Wei & Hadigheh, 2024)	Establecer una temperatura óptima para reciclar fibras de carbono de CFRP, minimizando los requisitos energéticos.	Se logró retener el 87.6% del módulo de tracción y el 80.3% de la resistencia de las fibras después del proceso de reciclaje.	Análisis cinético, pirólisis, gasificación.	Flujo de nitrógeno, tasas de calentamiento.	Aplicación de una tasa de flujo de nitrógeno baja, tasa de calentamiento moderada.
A15	(Kataki et al., 2024)	Convertir los biorresiduos de la industria de pulpa y papel en biochar para mejorar la sostenibilidad ambiental y empresarial.	La conversión de biorresiduos a biochar puede reducir los impactos ambientales negativos y mejorar la sostenibilidad empresarial.	Pirólisis, análisis termogravimétrico, cromatografía, difracción de rayos X (XRD).	Microscopio electrónico, espectroscopia IR	Caracterización de biorresiduos y su conversión pirolítica para producir biochar.
A16	(Soares et al., 2024)	Utilizar biochar de maíz como adsorbente alternativo para el control de pesticidas en agua.	Se obtuvieron recuperaciones de pesticidas entre 75.9% y 117% bajo condiciones óptimas, con límites de detección	Análisis termogravimétrico, cromatografía, espectroscopia	Columna C18. Cromatografía, analizador de propiedades físicas.	Extracción en fase sólida (SPE). Diseño factorial 2 <sup>3</sup> evaluando lo adsorbente, muestra y eluyente.

N°	Autor	Propuesta	Resultado	Técnicas	Instrumentos	Procedimiento
A17	(Lesiak, 2024)	Evaluar los diferentes métodos de conversión de biomasa en biocombustibles.	Se identificaron procesos termoquímicos como la pirólisis y la gasificación como métodos efectivos para obtener gases ricos en hidrógeno a partir de biomasa.	Pirólisis, gasificación, licuefacción hidrotermal.	Catalizador y reactor.	Conversión termoquímica biocatálisis. Foto biocatálisis.
A18	(Afrah et al., 2024)	Investigar cómo la temperatura de pirólisis y la composición de la biomasa afectan las características del bioaceite.	La temperatura de pirólisis y la composición de la biomasa a 300-350 °C y con una composición de 80% cáscaras de coco y 20% madera de caucho, se obtuvo un 50.19% de fenol.	Pirólisis, cromatografía, espectroscopia.	GC-MS, analizador de pH.	Caracterización del bio-aceite mediante GC-MS.
A19	(L. Efiyanti et al., 2023)	Sintetizar y caracterizar un carbón activado con Co como catalizador para la pirólisis de LDPE.	El carbón activado mostró una calidad cercana al 90% del estándar nacional indonesio, con una acidez de 10,555 mmol/g y un tamaño de cristal metálico de 0.56 nm.	Análisis termogravimétrico, pirólisis, espectroscopia, difracción de rayos X, Análisis cinético	FTIR, SEM-EDX, XRD, SAA	Carbonización y activación del carbón a 400 °C y 800 °C con vapor, impregnación con Co (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .
A20	(Asghar et al., 2023)	Evaluar el potencial bioenergético de Saccharum bengalense mediante pirólisis.	Valores de energía de activación adecuados para la pirólisis.	Análisis termogravimétrico, pirólisis, análisis cinético, cromatografía.	Analizador termogravimétrico, GC-MS.	Análisis de cinética Modelos de regresión Validación de datos experimentales con modelos M-DAEM.
A21	(Steblevskaya et al., 2022)	Demostrar la eficiencia del método de extracción pirolítico y su combinación con el método de oxidación plasma-electrolítica.	Se logró formar capas funcionales de composición compleja y crear composiciones multicapa en sustratos de diversas naturalezas.	Pirólisis, espectroscopia, análisis cinético.	Reactor de pirólisis, equipo de oxidación por plasma.	Métodos de extracción-pirolítico y oxidación plasma-electrolítica.

N°	Autor	Propuesta	Resultado	Técnicas	Instrumentos	Procedimiento
A22	(Pramono et al., 2022)	Comparar los efectos antibacterianos del extracto de hojas de tabaco obtenido mediante el método de reflujo térmico y el método de pirólisis.	El bio-aceite obtenido por pirólisis mostró zonas de inhibición contra varias bacterias.	Pirólisis, espectroscopia, análisis cinético	Equipos de pirólisis, placas de Petri.	Análisis de cinética de reacción. Modelos de regresión ANN. Validación de datos experimentales con modelos M-DAEM.
A23	(Setianingsih et al., 2022)	Estudiar la influencia de diferentes métodos de pirólisis secuencial en las características de las nanoestructuras de carbono.	El método hidrotermal-microondas produjo nanoestructuras de carbono con menor índice de cristalinidad de celulosa.	Pirólisis, difracción de rayos X, espectroscopia, análisis cinético.	Microondas de laboratorio, SEM.	Método hidrotermal-microondas. Método reflujo-microondas.
A24	(Weiss et al., 2022)	Evaluar la capacidad de producir carbón a partir de residuos industriales mediante pirólisis.	Las muestras de pirólisis con catalizador mostraron valores de PCU de 5,473 kcal/kg, lo que es interesante para la generación de energía.	Pirólisis, análisis termogravimétrico, cromatografía.	Catalizador de arcilla roja. Analizador termogravimétrico.	Caracterización de carbono orgánico, análisis de metales y cloruros mediante espectrometría y cromatografía.
A25	(Mamad Gandidi et al., 2022)	Incrementar la fracción de gasolina utilizando pirólisis escalonada con un reactor catalítico de lecho largo.	Aumento significativo en la fracción de gasolina del combustible líquido, con valores de 84.08% y 56.94% en las salidas superior e inferior del reactor, respectivamente.	Pirólisis, cromatografía, análisis cinético.	Reactor catalítico de lecho largo (LBCR).	Configuración de temperatura del reactor a 200 °C–300 °C, pirólisis a 400 °C, análisis de fracción de gasolina.
A26	(Khol'kin et al., 2021)	Se propone el uso del método de extracción-pirólítico para producir materiales inorgánicos.	Obteniendo un diagrama de flujo para una tecnología de extracción-aditiva, desde la materia prima hasta los artículos finales.	Pirólisis, análisis cinético.	Sistemas líquido-líquido. Pastas.	Impresión 3D con materiales en polvo.

N°	Autor	Propuesta	Resultado	Técnicas	Instrumentos	Procedimiento
A27	(Suherman et al., 2021)	Estudiar la aplicación de puntos de carbono conjugados con colistina para la detección de Escherichia coli.	Se encontró que los puntos de carbono con colistina tienen una morfología esférica con un diámetro de alrededor de 3-10 nm.	Pirólisis, espectroscopia, análisis cinético.	GC-MS (cromatografía de gases-espectrometría de masas).	Síntesis de puntos de carbono mediante pirólisis, caracterización de morfología, análisis de absorbancia y fluorescencia.
A28	(Ferreira et al., 2020)	Evaluar los efectos de varios parámetros en el proceso de pirólisis lenta para optimizar el rendimiento de bio-aceite.	El bio-aceite mostró un alto contenido de compuestos oxigenados y es prometedor como aditivo antioxidante para biodiesel.	Análisis termogravimétrico, pirólisis, cromatografía, análisis cinético, espectroscopia	GC-MS, FTIR, HPTLC.	Diseño compuesto central rotacional, metodología de superficie de respuesta, función de deseabilidad.
A29	(Yang et al., 2020)	Examinar los componentes químicos de la madera para expandir la utilización de alto valor.	Se identificaron más de 169 componentes químicos en la madera. La composición química de la corteza es diferente a la de la madera.	Pirólisis, cromatografía, análisis cinético.	PY-GC-MS.	Análisis de componentes químicos, comparación de la composición química entre la corteza y la madera.
A30	(Yue et al., 2020)	Analizar las propiedades de componentes insolubles en quinolina del alquitrán.	Es una esfera de carbono submicrométrica con buena uniformidad	Análisis termogravimétrico, espectroscopia.	Analizador de partículas, difractómetro de Rayos X	Separación de componentes insolubles, Análisis de las propiedades.
A31	(Zhang et al., 2024)	Producción de bio-aceite a partir de tallos de algodón mediante la tecnología de licuefacción hidrotermal.	El CeO <sub>2</sub> y el NaOH lograron el mayor rendimiento de bio-aceite debido a las reacciones redox Ce <sup>3+</sup> /Ce <sup>4+</sup> .	Espectroscopia, análisis termogravimétrico.	Analizador termogravimétrico, espectroscopia IR	La mezcla se sometió a licuefacción hidrotermal en reactor de alta presión.

N°	Autor	Propuesta	Resultado	Técnicas	Instrumentos	Procedimiento
A32	(Zhao et al., 2024)	Método sostenible y eficiente para controlar la contaminación por metales pesados.	Biochar modificado con anatasa (TBC) logró una degradación del Cr (VI) del 99.63% bajo condiciones de luz.	Espectroscopia, difracción de rayos X.	SEM-EDX, espectroscopia IR.	Las muestras se caracterizaron mediante XRD, SEM y XPS para confirmar la distribución.
A33	(Zhao et al., 2024)	Eliminación eficiente de tetraciclina del agua mediante la utilización de biochar poroso derivado de residuos de fermentación.	A 298 K, la capacidad máxima de adsorción del biochar OSOB-3-700, calculada con el modelo de Langmuir, alcanzó los 1096.871 mg/g.	Espectroscopia, análisis termogravimétrico.	Analizador termogravimétrico, espectroscopia IR.	Secar los residuos de fermentación de oxitetraciclina (OFRs) a un peso constante a 105 °C, molerlos y tamizarlos.
A34	(Adamczyk et al., 2024)	Propiedades fisicoquímicas del biocarbón derivado de la celulosa en el rendimiento de las celdas de combustible.	Biocarbones obtenidos a temperaturas de 400 a 600 °C presentaron el mejor rendimiento en las DC-SOFC.	Difracción de rayos X (XRD), espectroscopia.	Microscopio electrónico, equipos de laboratorio.	Conversión térmica en un rango de 200 a 850 °C en una atmósfera de gas inerte (N <sub>2</sub> ).
A35	(Lin et al., 2024)	Co – pirólisis rápida de lodos de papel y rastrojo de maíz.	La formación de fenoles y CO se ve mejorada durante la co-pirólisis, mientras que las interacciones sinérgicas inhiben la producción de H <sub>2</sub> .	Análisis termogravimétrico, difracción de rayos X (XRD), Espectroscopia.	Microscopio electrónico, Equipos de laboratorio.	Lodos de papel y maíz, molerlos y tamizarlos a 80-100 mallas, y secarlos a 105 °C por 48 horas.
A36	(Korus et al., 2024)	Modelo de adsorción dual de CO <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> para el análisis del desarrollo de microporos en el biocarbón.	Uso de O <sub>2</sub> como sonda permitió recolección de isothermas para biocarbón pirolítico ultramicroporoso, y adsorción de N <sub>2</sub> fue insignificante.	Espectroscopia.	Microscopio electrónico, espectroscopia IR.	Análisis químicos y estructurales, y se evaluó su rendimiento electroquímico en celdas de combustible.

N°	Autor	Propuesta	Resultado	Técnicas	Instrumentos	Procedimiento
A37	(Zuhara et al., 2024)	Pirólisis de biosólidos y cartón de desecho para investigar el efecto de los parámetros operativos	La temperatura y la proporción de mezcla tuvieron el mayor impacto, a 650 °C, el área de superficie máxima fue de 10.34, 170.4 y 124.8 m <sup>2</sup> /g.	Análisis cinético, pirólisis,	Equipos de laboratorio, microscopio electrónico.	Pirólisis en horno de mufla a temperaturas de 350 a 850 °C, y tiempos de residencia de 30 a 180 minutos.
A38	(Nav et al., 2023)	Biochars producidos a partir de residuos de madera para eliminación de fracciones de material orgánico disuelto (DOM).	Los biochars activados con CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O eliminan el 78% de la demanda química de oxígeno (COD) del agua residual, mientras que el biochar pirolítico eliminó el 64%.	Espectroscopia, cromatografía.	Espectroscopia IR, equipos de pirólisis.	Mezclar diferentes concentraciones de biochar con el agua residual y agitar la mezcla durante 24 horas.
A39	(Sultana et al., 2023)	Producción de bio-aceite a partir de torta de semilla de caucho no comestible mediante pirólisis.	Rendimiento óptimo de bio-aceite (59.94% en peso) y biochar rico en carbono (27.03% en peso) se obtuvo a una temperatura de 500 °C.	Análisis termogravimétrico, pirólisis, espectroscopia.	Equipos de pirólisis, microscopio electrónico.	Pirólisis en un reactor horizontal alimentado con gas inerte (nitrógeno) a una tasa de flujo de 50 mL/min.
A40	(Chanda et al., 2024)	Biochar a partir de residuos de tallos de coliflor para la adsorción y reducción efectiva de cromo hexavalente (Cr(VI)).	Biochar activado con ácido fosfórico (PBC) con capacidad de adsorción de Cr(VI) de 64.10 mg/g, siguiendo una cinética de pseudo-segundo orden.	Análisis termogravimétrico, difracción de rayos X (XRD).	Microscopio electrónico, espectroscopia IR	Se somete a pirólisis en condiciones limitadas de oxígeno a temperaturas de 350 y 450 °C.
A41	(Cao et al., 2024)	Pirólisis de residuos de anís estrellado (ANI) en atmósferas de N <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> , así como en analizar la cinética	Pirólisis de ANI en tres etapas, siendo la principal entre 161.5 y 559.1 °C. Menor energía de activación fue en (179.44-190.17 kJ/mol).	Análisis termogravimétrico, pirólisis, espectroscopia, análisis cinético.	Equipos de laboratorio.	Anís estrellado a pirólisis en atmósferas de N <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> , registrando los cambios en la masa.

N°	Autor	Propuesta	Resultado	Técnicas	Instrumentos	Procedimiento
A42	(Sarve et al., 2022)	Valorización de la lignina de desecho industrial mediante pirólisis en presencia de aditivos, para producir bio-aceite.	Pirólisis de lignina con H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> , ZnCl <sub>2</sub> y KOH a 380 °C produce diferentes rendimientos de bio-aceite y carbón. El H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> generó el mayor porcentaje de bio-aceite (37%).	Análisis termogravimétrico, cromatografía.	Microscopio electrónico SEM, analizador termogravimétrico.	Purificar la lignina de desecho industrial, mezclarla con los aditivos y someterla a pirólisis en un reactor a 380 °C.
A43	(Bhatnagar et al., 2020)	Pirólisis escalonada de residuos agrícolas para obtener productos químicos de valor añadido.	Pirólisis de cáscaras de maní, pellets de racimos vacíos de frutas a 305 °C en la primera etapa y 600 °C la segunda etapa.	Análisis termogravimétrico, pirólisis.	Analizador termogravimétrico, equipos de laboratorio	Pirólisis escalonada en un reactor de lecho fijo a las temperaturas específicas para los productos obtenidos.
A44	(Raček et al., 2024)	Producción de biochar a partir de residuos alimentarios mediante pirólisis térmica, para evaluar aplicaciones.	La composición inicial de los residuos alimentarios influye significativamente en las características del biochar obtenido.	Análisis termogravimétrico, Difracción de rayos X (XRD).	Espectroscopia IR	Residuos mezclados con aditivos orgánicos y catalizadores, someter la pirólisis a 600 °C.
A45	(B. Wang et al., 2024)	Conversión de residuos de envases multicapa mediante pirólisis bajo una atmósfera de CO <sub>2</sub> .	Deshidratación por debajo de 200 °C, degradación del cartón entre 200-400 °C, desvolatilización del polietileno entre 400-550 °C.	Análisis termogravimétrico, difracción de rayos X (XRD).	Microscopio electrónico SEM, analizador termogravimétrico.	La pirólisis se llevó a cabo en un reactor bajo una atmósfera de CO <sub>2</sub> , registrando los cambios en la masa.

Nota: Elaborado por el autor.

La tabla 11, se detallan la información de los 45 artículos seleccionados, donde se analiza su propuesta, los resultados obtenidos por los autores, las técnicas establecidas junto a sus instrumentos, y de un breve procedimiento, además permite el desarrollo de método multicriterio de toma de decisiones (MCDM) como el AHP (proceso jerárquico analítico) para la selección de herramientas a utilizar en el desarrollo del trabajo de investigación.

### **1.3. Fundamentos teóricos (variable independiente).**

#### **Generación de residuos en Ecuador.**

Según Burneo et al. (2020) el Ecuador con más de 16 millones de habitantes genera un volumen enorme de residuos, estos se generan en actividades diarias del ecuatoriano promedio, pero así mismo, estas no terminan en vertederos donde pueden ser reciclados sino que en otros sitios, donde contaminan el paisaje y el medio que nos rodea, esto se debe a una mala gestión por parte de las respectivas autoridades, y al déficit de recursos destinados a este sector, por lo tanto debilita su estructura organizativa sólida, generando problemas, que van solucionándose a medida que nos vamos desarrollando como país.

#### **Industria de papel.**

Este tipo de fábricas generan el papel a partir de fibras vegetales que son base para su creación. La industria de papel maneja una gran cantidad de biomasa, que incluye desde la plantación de árboles hasta la conversión de esta biomasa en pulpa y papel. Este proceso genera una variedad de biorresiduos, como polvo de madera, corteza y lodos de efluentes (Blanchard & Mekonnen, 2024).

#### **Residuos industriales.**

Son un conjunto de desechos generados por el ser humano, por ejemplo, el papel y el cartón, a menudo acaban en lugares inapropiado generando una abundante biomasa de desechos, que deben pasar por procesos de reciclaje conocidos, pero entre ellos destacan dos como la gasificación y la pirólisis, ambos ayudan al proceso del tratamiento de desechos, permitiendo mitigar la contaminación ambiental (Yek et al., 2024).

#### **Productos de embalaje.**

Entre los productos de embalaje que más se producen son el papel y el cartón debido a que son los más demandados en las empresas, para usos cotidianos como organización de documentos o alimentos en lata. La celulosa es un polímero natural extraído principalmente del pino, es la materia prima para la producción de estos elementos, por ese motivo es importante innovar utilizando nuevos agentes que permitan compuestos utilizando fibras sintéticas para hacer productos más ecológicos y salvaguardar el ecosistema. El ciclo de vida de estos como lo es el papel, es primero transformarlo en pulpa que pasa por un proceso químico, Kraft para eliminar la lignina, seguido a un proceso de blanqueo para eliminar otros componentes amorfos, como la hemicelulosa y la lignina restante, luego se produce el papel y este finaliza en vertederos para empezar nuevamente su ciclo de vida (de Oliveira et al., 2023).

### **Pirólisis.**

Se entiende como pirólisis al proceso de descomposición térmica de los residuos que ocurren ciertas condiciones con poco o ningún oxígeno, a temperaturas altas que varía entre 500 – 850 °C. Por lo que consigue que los materiales orgánicos se conviertan en biocombustibles que son utilizados con fuente de energía, esto implica que se otorgue una solución a la gestión de los residuos y que su producción permita una solución que favorezca al medio ambiente (Weiss et al., 2022).

### **Modelado cinético.**

La definición de los modelos cinéticos es el uso de una serie de cálculos matemáticos que resalte de forma específica a la pirólisis, a la descripción de su respectiva tasa de reacción en función al material otorgado al reactor. Al optimizar estos modelos, se pueden determinar las condiciones óptimas para maximizar la producción de bio-aceite y biocarbón, mejorando así la eficiencia del proceso (Kumar et al., 2024).

### **Viabilidad económica.**

Se valora la economía tomando en cuenta los gastos de producción, la eficacia del procedimiento y el valor del producto final. La valoración del ciclo de vida (LCA) es un instrumento relevante que facilita el análisis del efecto ambiental de todo el procedimiento, desde la recolección de aceite utilizado hasta la fabricación y utilización de biocombustibles. Esta perspectiva integral asegura que las ventajas medioambientales no excedan los efectos adversos en otras fases del ciclo de vida (Mohanty et al., 2024).

### **Biochar.**

Es un biocarbón que se produce mediante proceso de pirólisis, se caracteriza por su capacidad para mejorar la gestión sostenible del suelo, que lo convierte en una solución prometedora para la agricultura y la gestión de residuos. La conversión de estos biorresiduos en biochar se realiza mediante un proceso termoquímico en un ambiente con poco oxígeno. Este proceso resulta en un material con una estructura porosa y una composición rica en nutrientes inorgánicos (Blanchard & Mekonnen, 2024).

### **Sostenibilidad ambiental y empresarial.**

Se refiere al enfoque que tienen las empresas para adoptar practicas responsables que minimizan el impacto a la huella ecológica, asegurando un uso eficiente de los recursos, generando rentabilidad y crecimiento a largo plazo un claro ejemplo es el biochar que no solo ayuda a reducir los impactos ambientales negativos asociados con los residuos industriales, sino que también mejora la sostenibilidad empresarial al proporcionar productos de valor

añadido que pueden ser utilizados en bioenergía y otras aplicaciones industriales (Blanchard & Mekonnen, 2024).

#### **1.4. Fundamentos teóricos (variable dependiente).**

##### **Hidrocarbonización hidrotérmica (HTC).**

Este procedimiento transforma los residuos orgánicos en sustancias carbónicas a través del uso de elevadas temperaturas y presiones en el contexto de agua. HTC incrementa la densidad de energía de los materiales procesados disminuyendo la cantidad de oxígeno y elevando la cantidad de carbono. Este procedimiento resulta especialmente beneficioso para la elaboración de biomasa húmeda, dado que no necesita secado previo y, por ende, es energéticamente eficaz (Kumar et al., 2024).

##### **Análisis TG-FTIR-GCMS.**

Según Asghar et al., (2023) indica que el estudio termogravimétrico, en donde se incluye a la espectroscopía infrarroja es un proceso con un nivel de sofisticación por el uso de la transformada de Fourier junto a la cromatografía de los gases y de la espectrometría de masas, conocido como (TG-FTIR-GCMS) como resultado, permite una mejor comprensión de los procesos pirolíticos.

##### **Economía circular y simbiosis industrial.**

De acuerdo Ahmetli et al. (2024) subraya el valor de la economía circular en su escrito, donde explica que es un sistema que conserva los productos y materiales en funcionamiento por el periodo más largo posible, obtiene el máximo provecho de estos durante su utilización y, finalmente, los recupera y recicla. Un componente fundamental de este método es la simbiosis industrial, en la que los residuos de una industria se emplean como recurso en otra industria.

##### **Bioenergía.**

Es energía producida por medio de distintos procesos termoquímicos, como lo es la pirólisis, gasificación, licuefacción y la combustión, estos procesos mediante tecnologías convierten la biomasa en energía, mediante la descomposición de componentes orgánicos, utilizando el calor, generando así energía útil. Esta innovación ha sido llamativa en los últimos años debido a que las industrias cuentan con los equipos necesarios para la transformación de estos componentes altamente desarrollados, demostrando ser una alternativa realmente útil (Fukuyama & Tan, 2023).

### **Potencial bioenergético.**

Según Asghar et al. (2023), en su artículo la bioenergía es una fuente viable, destacando su capacidad de mitigar la contaminación, siendo un método prometedor debido a su alta eficiencia energética y su capacidad para reducir emisiones de gases de efecto invernadero, en comparación con otras energías, por ejemplo: los combustibles fósiles convencionales, que a la larga terminan afectando al ecosistema en el que vivimos.

### **Integración de tecnologías de energía renovable.**

Se comprende a partir de Lee et al., (2023) que al hablar de integración de tecnología para el proceso de conversión termoquímicos dirigido a la biomasa, en conjunto a las energías renovables como la solar, eólica, entre otros, permiten un sistema que no se limite a una sola fuente de energía, por el contrario, esto permite el aumento de la efectividad en el suministro energético y de una solución sólida a posibles problemas futuros.

### **Procesos termoquímicos.**

Dentro de estos procesos, existen tres principales que son: la gasificación, la pirólisis y la carbonización hidrotermal, que las tres cumplen con la función de la obtención de biocombustibles mediante la conversión de la biomasa que es abundante en lignocelulosa, mientras que la gasificación produce más gas por una alta presencia de calor, la pirólisis se obtiene por la ausencia de oxígeno en la estructura en donde se obtienen los derivados. La carbonización hidrotermal utiliza agua a alta presión y temperatura para convertir la biomasa en un carbón rico en energía (Lee et al., 2023).

### **Desafíos y perspectivas.**

Se resalta que el uso de sistemas integrados, permite a las empresas que se enfrenten a una serie de desafíos en donde se incluye la propuesta como la optimización de los procesos, la reducción de los costos de producción y una mejora en la eficiencia de las actividades involucradas, además, que se presenta todas las oportunidades que permitan el desarrollo constante, mientras que en las investigaciones estén también centradas en la aplicación de las nuevas tecnologías, destinados a los materiales y a los procesos evaluados para mejorar su impacto económico y su relación al medio ambiente (Mohanty et al., 2024).

### **Metodología de superficie de respuesta (RSM).**

La RSM es una técnica estadística que se utiliza para optimizar procesos mediante el diseño de experimentos y el análisis de los efectos de múltiples variables. En el contexto de la pirólisis, la RSM ayuda a identificar las condiciones óptimas para maximizar la producción de

bio-aceite y biocarbón, considerando factores como la temperatura, el tiempo de residencia y la composición del material de partida (A. Kumar et al., 2024).

#### **Caracterización analítica.**

La caracterización analítica requiere la utilización de métodos como la termogravimetría vinculada a la espectroscopía infrarroja (TG-FTIR) y la termogravimetría vinculada a la cromatografía de gases y la espectrometría de masas (TG-GC/MS) para examinar los productos de la pirólisis. Estos métodos facilitan la identificación y cuantificación de los compuestos que se encuentran en los productos de la pirólisis, ofreciendo datos útiles acerca de las reacciones químicas que suceden durante el procedimiento (Kumar et al., 2024).

#### **Métodos de reciclaje.**

Nacen de la necesidad, debido a que el crecimiento de la población y de las urbes es rápido, lo que presenta desafíos potenciales para un desarrollo sostenible, el propósito de estos métodos de reciclaje es limpiar el medio ambiente, haciendo uso de la tecnología con la que se cuenta en la actualidad, resultando así en una mitigación de patógenos que se encuentran en nuestros alrededores (Akinsemolu et al., 2024).

#### **Medioambiente.**

Se trata de un grupo de componentes naturales que nos envuelven, que inciden en el progreso y conducta de nuestro mundo. Una adecuada administración de los recursos naturales favorece al medio ambiente y a la comunidad, tanto en áreas urbanas como rurales. Entender estos conceptos facilita una organización más eficiente y posibilita proteger el ambiente en el que residimos (McLeod et al., 2024).

#### **Impacto ambiental.**

La generación de bioenergía a partir de la biomasa lignocelulósica es una estrategia crucial para mitigar el cambio climático y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Estos sistemas no solo proporcionan una fuente de energía renovable, sino que también contribuyen a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y promueven el uso sostenible de los recursos naturales (Lee et al., 2023).

### **1.5. Recapitulación del capítulo 1.**

Para este primer capítulo en el trabajo de investigación, se plantea el uso de antecedentes que indiquen un aporte sobre el tema de estudio y de cómo se ha cumplido, además de una serie de procesos termoquímicos que se han empleado en la conversión de biomasa con la finalidad de la obtención de bioenergía tanto como biocarbón o bio-aceite. Entre

los artículos seleccionados los métodos de mayor uso son la pirólisis y la gasificación que ambas cumplen que la obtención de energía obtenidas de los residuos escogidos.

Se ha desarrollado una revisión de investigaciones, con relación a los equipos y métodos empleados en investigaciones similares. Las técnicas más relevantes comprenden la aplicación de reactores de pirólisis, analizadores termogravimétricos (TGA), espectroscopía FTIR y cromatografía de gases junto con espectrometría de masas (GC-MS). Por lo tanto, se resalta que los distintos enfoques metodológicos que han influenciado a los resultados determinados, como es el caso de la pirita, que provocó una mejoría del 33.9% con relación a la producción de petróleo de diferentes pruebas señaladas. Por otro lado, el uso de herramientas como software de dibujo y del ciclo de vida (LCA) ha tenido una alta relevancia en la evaluación de la eficiencia en los procesos y de su impacto al medio ambiente. Se evidencia que los hallazgos obtenidos en el estado del arte mantienen un equilibrio entre la sostenibilidad y rentabilidad en el sector industrial.

## CAPÍTULO II

### MARCO METODOLÓGICO

Para el desarrollo de un marco metodológico se estableció: el enfoque, los métodos, técnicas e instrumentos que se utilizaron en el desarrollo de la investigación, para dar mayor impacto al lector, dependiendo el tipo de estudio que se vaya a realizar. Estos ayudan a proporcionar una estructura, donde se redactó cada actividad que permita recolectar información de forma veraz, planificando cada proceso e identificando patrones.

Para Mbuagbaw et al. (2020), los estudios metodológicos son importantes por el motivo que examinan el diseño, y análisis de informes de otros artículos, que es un proceso crucial para darle una base sólida al proyecto planteado, identificando así ideas claras y coherentes bien sustentadas.

Con la elaboración del estado del arte (capítulo I), se identificó el uso de técnicas con el análisis termogravimétrico (TG), la pirólisis (PL), esto conlleva una serie de instrumentos como equipos de laboratorio (PL1), analizador termogravimétrico (TG1) y el uso de herramientas de modelado (AC1) para que sean aplicados en el desarrollo de trabajo de investigación.

#### **2.1. Enfoque de investigación.**

Como expresó Mbuagbaw et al. (2020), en su artículo es importante identificar el enfoque que se va a plantear en una investigación, para desarrollar las ideas que presenten la calidad, integridad, coherencia y el cumplimiento de directrices organizada y jerárquicas, evitando caer en ambigüedades, dando como resultado conceptos bien definidos.

Se considera el enfoque cuantitativo como un método de investigación que utiliza datos, números, criterios y objetivos para analizar y clasificar información actual. A través de este método se realizó la toma de decisiones para el desarrollo de proyectos, permitiendo establecer diferentes escenarios con información cuantificable y respaldada, además de ser un método comúnmente utilizado en investigaciones que buscan establecer relaciones causales, patrones o predicciones mediante análisis, suelen incluir herramientas como encuestas para validar las hipótesis.(Alguliyev et al., 2024).

A través de los estudios cuantitativos, se identificó los residuos industriales, que serán aprovechados a través del reciclaje para su uso en el método pirolítico, además, se utilizó programas computacionales para el diseño del proceso pirolítico, en donde se estimó la dimensiones y procesos para producir energía de estos desechos, estableciendo el potencial

energético de la bioenergía producida. Además de eso se identificó la viabilidad económica del método, incluyendo los respectivos análisis y criterios técnicos para implementar estas técnicas en otras empresas, maximizando la generación de energía ecológica, buscando satisfacer las necesidades energéticas y reduciendo la huella de carbono.

## **2.2. Diseño de investigación.**

El diseño de la investigación debe cumplir con el objetivo de proporcionar una representación estructurada de cómo se abordan las preguntas de investigación en un estudio de enfoque cuantitativo. Este proceso ayuda a comprender las acciones del investigador, cuando se planifica de manera correcta las acciones a realizar, los estudiantes y profesionales pueden dar valor a dicha información.

Para el desarrollo del diseño de un método pirolítico se decidió escoger el diseño no experimental el cual se caracteriza por la observación de variables sin la manipulación. Se especifica como transversal o transeccional, es decir, que se caracterizó por recopilar información en un solo momento en el tiempo, con el objetivo de describir las variables y analizar las relaciones que tienen entre ellos, permiten medir fenómenos como las percepciones, actitudes o efectos inmediatos (Hernández & Mendoza, 2018). Los investigadores analizan la relación entre variables del entorno natural, utilizando encuestas, análisis de caso y observaciones, permitiendo entender cómo se relacionan las variables, lo que lo convierte en una herramienta útil.

Al utilizar este tipo de herramientas se puede captar información sobre la empresa y cuantos residuos produce, ya que al realizar el modelado de cómo aprovechar estos lodos residuales para generar bioenergía, generando una idea innovadora y ecológica. Por ese motivo el diseño de la investigación se lo considera la base de la cual se va a direccionar el tipo, se escoge el método correspondiente, también la recolección de datos y la interpretación de los resultados. Por ese motivo saber gestionar esta información es importante ya que permite mantener el control de las variables presentadas y mantener el enfoque (Vizcaíno et al., 2023).

La hipótesis del estudio realizado es la siguiente: propuesta del proceso pirolítico permite aprovechar de forma eficiente los residuos industriales, generando energía renovable y subproductos de valor.

**Estudio descriptivo:** se centran en investigar la incidencia de los diferentes niveles de una o más variables dentro de una población, este proceso consiste en identificar y ubicar a un grupo de personas, objetos o fenómenos en diversas variables para proporcionar una descripción detallada, es decir busca pronosticar cifras, en base a datos de estudios detallados.

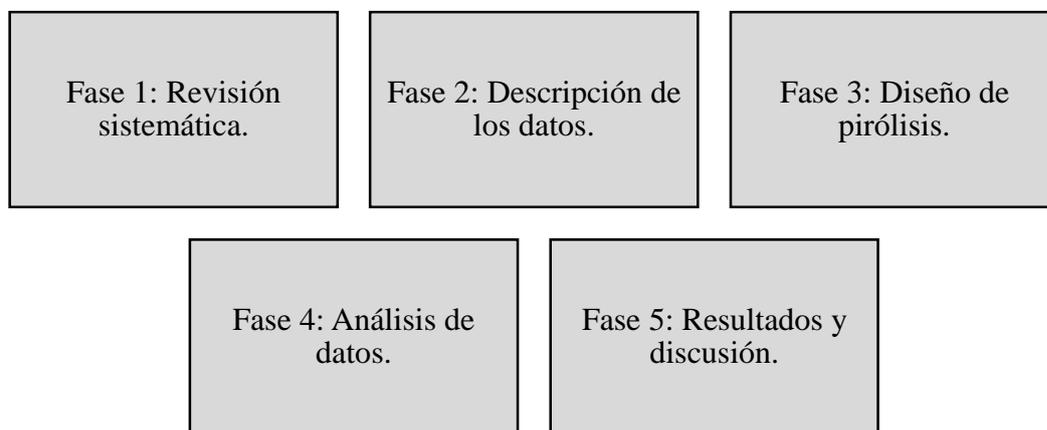
**Estudio correlacional:** este tipo de estudios tiene como finalidad comprender la conexión o grado de asociación entre dos o más variables de un tema específico, estas variables deben ser medibles para poder ser analizadas y vinculadas entre sí, el enfoque de estos estudios es identificar las posibles relaciones de causa-efecto.

### 2.3. Procedimiento metodológico.

Un procedimiento es una secuencia de pasos que se utilizó para la estructuración del estudio y asegurar los resultados, por esto mismo, se estableció el siguiente procedimiento que se basó de los trabajos de Shahrin et al., (2024) y Prabha et al., (2024) como se observa en la figura 12.

**Figura 12.**

*Fases de procedimiento metodológico.*



Nota: Elaborado mediante los autores (Shahrin et al., 2024) y (Prabha et al., 2024).

**Fase 1 (revisión sistemática):** en esta fase, se estableció una revisión bibliométrica, que tuvo como finalidad, el análisis de la literatura existente en torno a los métodos pirolíticos aplicados al reciclaje de residuos industriales. Este proceso se desarrolló para estructurar el estado del arte (capítulo I) de la investigación, identificando las tendencias más relevantes, así como las técnicas e instrumentos utilizados por otros investigadores.

**Fase 2 (descripción de los datos):** se recopiló la información en relación con las características de la empresa, sus tipos de residuos generados, y del volumen de lodos obtenidos del cartón y papel reciclado. Además, para la encuesta dirigida a los trabajadores de la empresa, se desarrolló la validación mediante juicios de expertos, para asegurar la fiabilidad de los resultados.

**Fase 3 (diseño de pirólisis):** se desarrolló el diseño del proceso de pirólisis, ajustado a las demandas y particularidades de la compañía de investigación. Existen varios factores técnicos que determinan la degradación de los lodos de cartón y papel, tales como la

temperatura, el periodo de residencia y las condiciones óptimas para la impresión. Adicionalmente, se reconoció el equipo y maquinaria que requieren los empleados.

**Fase 4 (evaluación de datos):** se corroboraron los hallazgos de los ensayos de laboratorio y se compararon los parámetros previamente fijados para la administración de los lodos residuales. El estudio se enfocó en valorar la eficacia del procedimiento en lo que respecta a la transformación de desechos en recursos energéticos, la disminución del volumen de residuos y la calidad de los subproductos logrados.

**Fase 5 (resultados y discusión):** se analizó los impactos del método pirolítico propuesto sobre la gestión de residuos en la Cartonera Orense, en donde se destaca el cumplimiento para los lodos de cartón y papel como una forma alternativa de energía útil y de la relevancia del método propuesto en el ámbito del reciclaje industrial.

#### **2.4. Población.**

Se refiere a todo el conjunto de individuos o elementos que se desea investigar, esta información es importante para la obtención de datos reales para el desarrollo del diseño de un método pirolítico, también representa el conjunto de personas que se verán beneficiadas, fortaleciendo la validez del estudio (Ahmad et al., 2023).

Como población se consideró a los trabajadores relacionados al departamento de ambiente en donde se identifica a un total de 38 personas que están distribuidas en diferentes áreas de trabajo como se observa en la tabla 12.

**Tabla 12.**

*Trabajadores del departamento de ambiente.*

Nº	Área	Total	Porcentaje
1	Administrativa	5	13.16%
2	Operativa	25	65.79%
3	Apoyo	8	21.05%
	Total	38	100.00%

Nota: Elaborado por el autor.

#### **2.5. Muestra.**

La muestra es un subconjunto de la población seleccionada, permitiendo estudiar un grupo más pequeño de manera más efectiva, así obtener resultados válidos y generales, debido a que eso garantizara resultados más precisos, como la cantidad de residuos generados, la

disposición a colaborar con el estudio y la viabilidad de implementar estas técnicas para la generación de bioenergía (Thacker, 2020).

Se estableció un muestreo probabilístico de los trabajadores con relación al departamento de ambiente de la empresa de estudio para una mayor 47 personas, esto tiene como propósito de identificar, los sujetos que se vinculen con la población, mediante el uso de la ecuación Ec.1 como se observa a continuación:

**Ecuación para selección de muestra.**

$$n = \frac{N * Z_a^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z_a^2 * p * q} \quad (1)$$

Donde las variables resaltan:

- $N$  = Tamaño de la población (47 trabajadores).
- $Z_a^2$  = Nivel de confianza (95% = 1.96).
- $p$  = Probabilidad de éxito, o proporción esperada (50 %).
- $q$  = Probabilidad de fracaso (50 %).
- $e$  = Precisión (Error admisible) = 10%.

$$n = \frac{38 * 1.96_a^2 * 0.5 * 0.5}{0.05^2 * (38 - 1) + 1.96_a^2 * 0.5 * 0.5}$$

$$n = 27.43 \gg 28 \text{ trabajadores}$$

Con los 28 trabajadores obtenidos, son estratificados por área en donde se utiliza la siguiente ecuación que es la fracción constante como número determinado de elementos (ksh), los resultados se muestran en la tabla 13.

$$ksh = \frac{n}{N} \gg \frac{28}{38} = 0.7368$$

Donde las variables son:

- $N$  = Tamaño de la población (38 trabajadores).
- $n$  = Tamaño de la muestra (27 trabajadores).

**Tabla 13.***Muestra estratificada de trabajadores.*

Nº	Área	Población	Tamaño de muestra
1	Administrativa	5	3
2	Operativa	25	19
3	Apoyo	8	6
	Total	38	28

Nota: Elaborado por el autor.

En la tabla 14, se aplicó un muestreo por conveniencia que se diferencia por su selección de criterios de exclusión o inclusión, para la obtención de la muestra se establece como criterio a la ausencia de personal o de su falta de disposición para que colabore con la obtención de los datos necesarios (Del Cid et al., 2011). Se estableció la participación de 20 trabajadores involucrados en la recolección de datos.

**Tabla 14.***Muestreo por conveniencia.*

Nº	Área	Total	Criterio	Total, de muestra
1	Administrativa	3	Ausencia o falta de colaboración	2
2	Operativa	19		16
3	Apoyo	6		3
	Total	28		20

Nota: Elaborado por el autor.

## 2.6. Variable del estudio.

En relación con la investigación cuantitativa, es importante clasificar las variables que se presenten en nuestro tema de investigación, debido a que desempeñan un papel fundamental para relacionar las ideas principales. Para Okoye & Hosseini (2024), la variable independiente es aquellas que se consideran la causa o ideas que los investigadores modifican deliberadamente mientras que las variables dependientes serían la respuesta o el efecto de la causa.

**Variable independiente:** diseño de un método pirolítico.

**Variable dependiente:** reciclaje de residuos industriales.

## 2.7. Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de los datos.

Para sustentar la información de la investigación se necesitan seleccionar métodos, técnicas e instrumentos para recopilar datos, según el foco de estudio y de acuerdo con el

análisis del estado del arte, sobre el diseño del método pirolítico (Del Cid et al., 2011). Entendiendo esto los métodos empleados para el modelado del método pirolítico permitieron recopilar los datos sobre la percepción de los trabajos respecto a la implementación de un nuevo sistema. La toma de decisiones correcta aprobó que el proyecto contribuya al desarrollo sostenible en la empresa Cartonera Orense.

### 2.7.1. Métodos de recolección de los datos.

Los métodos de investigación son estrategias generales que guían el abordaje de las preguntas de investigación y la consecución de objetivos específicos. Entre los métodos más comunes se incluyen el experimental, que examina relaciones causales mediante la manipulación de variables; el observacional, que se basa en la observación sistemática de sujetos en su entorno natural; y el de encuesta, que utiliza preguntas estructuradas para recopilar información (Vizcaíno et al., 2023).

Se implementó el método deductivo, que tiene como finalidad el reconocimiento de los componentes, como la cantidad de residuos industriales y como se pueden aprovechar estos recursos para generar energía, dándoles una segunda vida ayudando a la empresa a economizar en costos eléctricos, además de seguir generando ideas que permiten cuidar al medioambiente.

Se diseñó un plan de recolección de datos, que está estructura por preguntas claves como el lugar, las personas que va dirigido, las técnicas e instrumentos utilizados para el desarrollo, esto permite que los resultados sean recopilados de una forma eficiente y estructurada, esto se observa en la figura 13.

**Figura 13.**

*Plan de recolección de datos.*

¿Lugar donde se va a realizar?	¿A quiénes va dirigido?	¿Qué técnica se utilizó?	¿Que instrumento se utilizó?
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalaciones de cartonera Orense, El Oro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabajadores de la empresa con relación al departamento de ambiente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Encuesta validada por juicio de expertos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuestionario de preguntas cerradas.</li> </ul>

Nota: Elaborado por el autor en base a Hernández & Mendoza, (2018).

### 2.7.2. Técnicas de recolección de los datos.

Las técnicas de investigación son procedimientos específicos que se utilizan dentro de un método para facilitar la recopilación, análisis o interpretación de datos (Vizcaíno et al., 2023).

Las técnicas que es utilizada es la encuesta, se especifica como estructurada y además se puede realizar el análisis de contenido, que implica la validación del contenido a partir de juicios de los expertos que aseguren que la técnica es aprobada para su ejecución con relación a la muestra seleccionada como se observa en la figura 14.

**Figura 14.**

*Validación por juicios de expertos.*

Descripción de tema de estudio	Selección de expertos	Valoración	Discusión
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es necesario aclarar la información determinada por el trabajo de estudio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollo de criterios de inclusión y exclusión de profesionales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entrega de instrumento de validación de ítems del cuestionario indicado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se resaltan los resultados obtenidos por la validación</li> </ul>

Nota: Elaborado por el autor.

### 2.7.3. Instrumentos de recolección de los datos.

La aplicación de instrumentos de recolección de datos, tiene como objetivo, el análisis de la información actual sobre el tema de investigación dirigido a la población muestral establecido con anticipación, entonces, especifica el uso de una cuestionario para la ejecución de la encuesta, esto a partir de la plataforma Google Forms, para la obtención de los resultados de forma inmediata, debido a la estructura de las respuestas que son del tipo cerradas para la obtención de resultados cuantificables. Además, se garantiza la precisión en la medición mediante el uso de programas estadísticos para el análisis, lo cual asegura una adecuada interpretación de los resultados.

La validación del cuestionario se llevó a cabo a través de un juicio de expertos, en el que se aplicaron criterios específicos de inclusión y exclusión para seleccionar profesionales con experiencia y conocimiento en el área del estudio. Estos criterios garantizaron que solo participaran expertos cuyas competencias estuvieran directamente relacionadas con el proceso

pirolítico y con el aprovechamiento de residuos industriales para la generación de bioenergía. Lo que aporta mayor validez y confiabilidad al instrumento empleado, a partir de los criterios de juicio de los especialistas permitió indicar una mejora del cuestionario, esto permite que en distintos aspectos se busque que el contenido sea adecuado y aclarado para la muestra poblacional escogida (Vizcaíno et al., 2023).

#### **2.7.4. Confiabilidad.**

Para establecer la fiabilidad de un instrumento de recolección de datos, se busca la medición de la producción a resultados homogéneos y que sea aceptables con relación a distintas circunstancias. Según Nyarugwe & Jespersen, (2024) indica que, para que una herramienta se considere fiable, es necesario que los resultados obtenidos sean uniformes para que así se garantice una exactitud para los datos que han sido recopilados.

Esto por esto, que estable el uso del coeficiente de alfa de Cronbach para el cuestionario para que se mida el nivel de consistencia para todos los resultados obtenidos.

#### **2.7.5. Validez.**

Para que su cumpla con la validación del instrumento de recolección de datos, tiene que pasar por un proceso de examinación, donde se verifica que la herramienta cumpla con el objetivo de la investigación, además que se garantice la obtención de los resultados necesarios para su representación en la elaboración de la propuesta (Nyarugwe & Jespersen, 2024).

Por lo tanto, para el desarrollo de la validez al instrumento establecido, se elaboró un procedimiento de validación mediante juicio de criterio por parte de expertos que son profesionales que cumplan con los requisitos indicados como la selección de los expertos para una correcta evaluación, que son como: la alta experiencia sobre el tema de estudio, que las dimensiones e indicadores tengan relación con los ítems y de sus respuestas.

### **2.8. Procedimiento de recolección de datos.**

A continuación, se presenta la tabla del procedimiento de recolección de datos, que detalla cada las actuaciones en cada uno de los planes determinados, para la obtención de resultados de una estructura como se observa en la tabla 15.

**Tabla 15.***Procedimiento de recolección de datos.*

Número	Plan	Actuaciones
1	Validación de instrumento de encuesta.	<ol style="list-style-type: none"> <li>Validación de instrumento por juicio de criterio de expertos.</li> <li>Ejecución de cuestionario mediante Google Forms y comunicado a empleados del departamento de ambiente.</li> <li>Determinación de confiabilidad de instrumento por alfa de Cronbach.</li> </ol>
2	Presentación de resultados.	<ol style="list-style-type: none"> <li>Tabulación de resultados de validación de expertos y datos obtenidos por dimensiones.</li> <li>Presentación de tablas y diagramas de resultados obtenidos.</li> <li>Verificación de hipótesis mediante prueba de prueba de Kolmogorov-Smirnov.</li> </ol>

Nota: Elaborado por el autor.

En primer lugar, la validación del instrumento que fue la encuesta garantiza la relevancia y exactitud de los datos. Esta operación empieza con una evaluación realizada por expertos, quienes analizan la encuesta en base a los objetivos de la investigación. Además, te inicia con la utilización de una encuesta de Google Forms, para la participación con el equipo del departamento de ambiente, optimizando la obtención de retroalimentación sistemáticamente recopilada y fácilmente recuperable. Para confirmar la fiabilidad de los datos recogidos, se realiza el cálculo alfa de Cronbach y se lleva a cabo un análisis estadístico para mostrar la consistencia interna del cuestionario

El segundo paso se ocupó de visualizar y ordenar los hallazgos, mostrando y representando gráficamente la información adquirida. Además, se busca presentar los resultados correctamente y hace que sea más fácil de entender con figuras dinámicas. También se utilizó un lenguaje más sencillo que puede ser más fácil de entender para los estudiantes. Para la demostración de la información se realizan tablas y gráficas representativas de los resultados de cada dimensión, para que al final de verifica la hipótesis mediante pruebas de normalidad como de Kolmogorov – Smirnov en donde se evalúa que los datos obtenidos tengan una distribución normal.

## 2.9. Aspectos éticos.

### Aspectos éticos nacionales.

Los estándares éticos en el Ecuador, tiene como finalidad el de proteger los derechos de los ecuatorianos que son partícipes de un proceso de recolección de datos donde se mantenga su integridad. Además, entre las leyes relacionadas esta: Ley Orgánica de Salud y el Código de Ética del Consejo de Educación Superior (CES) en donde se resaltan distintas pautas dirigidas a la protección a la privacidad y en consentimiento por parte de los trabajadores involucrados en la recolección de datos establecida por el autor.

### Aspectos éticos internacionales.

A nivel internacional, la investigación está sujeta a estándares éticos ampliamente aceptados, como los definidos por la declaración de Helsinki y las directrices del Consejo de Instituciones Médicas Internacionales (CIOMS), y promueven un compromiso de respeto a los participantes y exactitud. Por otro lado, con los tratados de derechos humanos tienden a proporcionar un exigente respeto a la dignidad y del respeto a los derechos a los participantes de las investigaciones, de forma especial en publicaciones que se relacionen a soluciones para mitigar el impacto al medio ambiente por parte de la industria (Kurihara et al., 2024).

### Principios empleados.

- **Respeto a las personas humanas:** este mandatario se manifiesta en el deber de conseguir el permiso de todos los participantes en la investigación. Esto garantiza que los trabajadores entrevistados de la entidad tengan total conocimiento del objetivo y alcance de la investigación, que su implicación sea voluntaria y no obligada, y que se conserve en todo momento su autonomía y dignidad.
- **Caridad:** el objetivo de esta investigación es beneficiar a las empresas y al medio ambiente mejorando el uso de residuos industriales como fuente de energía. El objetivo es que los conocimientos adquiridos fomenten procesos más sostenibles y eficaces, beneficiando tanto a las empresas como a las comunidades al reducir la dependencia de las fuentes de energía tradicionales y minimizar el impacto ambiental.
- **No maleficencia:** para este principio, se garantiza que no se provoque algún perjuicio a los participantes del estudio. Además, que el desarrollo de la recolección de datos sea aplicado a los trabajos sin la necesidad que se dé un perjuicio a la salud del colaborado.
- **Justicia:** que la investigación cumpla con valores como la equidad y la igualdad durante la recolección de datos, es decir, que no se ningun perjuicio en la participación de un trabajador y que se mantenga este proceso de forma justa. Además, se da prioridad a

que todos los participantes de la investigación sean escogidos sin distinción y obtengan las mismas ventajas de las conclusiones alcanzadas.

### 2.9.1. Operacionalización de las variables.

**Tabla 16.**

*Operacionalización de variables.*

Variable dependiente	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicadores	Item	Escala
Método pirolítico	Método de tratamiento térmico donde no interviene oxígeno, descomponiendo los residuos orgánicos mediante el uso de calor fuerte, por lo que es utilizado para la conversión de desechos involucrados como el cartón y papel para la obtención de recursos, como biomasa, carbón vegetal y gases de síntesis (Shahrin et al., 2024).	El desarrollo de un diseño específico del proceso de pirólisis aplicado a los residuos (lodos) de cartón y papel generados en la empresa Cartonera Orense. Esto incluye la identificación de los parámetros óptimos de temperatura, tiempo y presión, la disposición de la maquinaria necesaria, y la implementación de programas computarizadas para validar el rendimiento del proceso.	Diseño del proceso.  Diseño de la infraestructura  Análisis del proceso.  Eficiencia del proceso.	Selección de parámetros operativos.  Tipo de pirólisis utilizada.  Distribución de equipos y máquinas.  Requerimientos de energía.  Modelado del proceso pirolítico.  Validación de resultados.  Rendimiento de la conversión térmica.  Impacto ambiental del proceso.	de Temperatura óptima para el proceso de pirólisis.  Tiempo de residencia de los residuos, presión requerida.  Tipo de pirólisis seleccionada.  Adaptabilidad del tipo de pirólisis a los residuos de cartón y papel.  Planos de distribución de equipos.  Áreas de almacenamiento de residuos.  Cálculo del consumo energético del sistema.  Análisis de la eficiencia en la conversión de residuos.  Análisis comparativo entre análisis de producto y fuentes de energía alternas.  Cálculo del poder calorífico de biochar.  Análisis de las emisiones de gases generados.	De intervalo.

**Tabla 16.**

*Operacionalización de variables (continúa).*

Variable independiente	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicadores	Ítem	Técnica
Reciclaje de residuos industriales	Se refiere al proceso de recolección, tratamiento y transformación de materiales de desecho generados por actividades industriales, con el fin de reutilizarlos como materia prima en otros procesos productivos o convertirlos en productos de valor añadido (L. Efiyanti et al., 2023).	Se evaluarán aspectos como el conocimiento de los empleados sobre los métodos de reciclaje, la efectividad de los procedimientos actuales para reciclar cartón, papel y lodos residuales, así como la percepción sobre la reducción del impacto ambiental.	Conocimiento sobre el reciclaje de residuos.  Procedimientos de reciclaje y su eficiencia.  Impacto ambiental del reciclaje.	Conocimiento de las técnicas de reciclaje.  Conocimiento del destino de los residuos.  Eficiencia del proceso de reciclaje.  Ajuste a normativas y control de calidad.  Reducción del impacto ambiental.  Reducción de la huella de carbono.  Mejora de la eficiencia con pirólisis.	<p>¿Conoce las técnicas de reciclaje que se utilizan en la empresa para el tratamiento de los residuos de cartón y papel?</p> <p>¿Está informado/a sobre la cantidad de residuos de cartón y papel que se reciclan actualmente en la empresa?</p> <p>¿Tiene conocimiento sobre el destino final de los residuos que no son reciclados?</p> <p>¿Tiene información sobre los beneficios ambientales del reciclaje de residuos de la empresa?</p> <p>¿Cree que el proceso actual de reciclaje de residuos industriales de la empresa es eficiente?</p> <p>¿El sistema de reciclaje actual permite un aprovechamiento máximo de los residuos generados en la empresa?</p> <p>¿El proceso de reciclaje en la empresa se ajusta a las normativas ambientales vigentes?</p> <p>¿Se realiza un control de calidad sobre el material reciclado para asegurar su reutilización en otros procesos?</p> <p>¿Considera que el reciclaje de los residuos de la empresa contribuye a disminuir el impacto ambiental en la comunidad?</p> <p>¿Cree que la gestión adecuada de los residuos reciclados reduce la generación de desechos en vertederos?</p> <p>¿Cree que el reciclaje de residuos contribuye a la reducción de la huella de carbono de la empresa?</p> <p>¿Considera que el reciclaje de lodos residuales ayuda a preservar los recursos naturales?</p> <p>¿Cree que la implementación de un método pirolítico podría mejorar la eficiencia del reciclaje de lodos residuales en la empresa?</p> <p>¿Cree que la pirólisis podría transformar de manera eficiente los lodos residuales en productos reutilizables?</p>	De intervalo.

	Ahorro de recursos y costos.	de y	¿Considera que el uso de pirólisis podría generar un ahorro de energía en el tratamiento de los residuos industriales? ¿Cree que la pirólisis podría reducir los costos de disposición final de los lodos residuales?
Percepción del método pirolítico.	Aceptación de la tecnología pirolítica.	de	¿Está de acuerdo con la idea de invertir en tecnologías como la pirólisis para tratar los residuos de cartón y papel? ¿Está de acuerdo en que la pirólisis podría ser una solución más sostenible para el manejo de residuos industriales en la empresa?
	Capacitación y percepción pública.	y	¿Cree que la implementación del método pirolítico requiere una capacitación especializada para los empleados de la empresa? ¿Considera que la pirólisis podría mejorar la percepción pública de la empresa en términos de sostenibilidad y responsabilidad ambiental? ¿Cree que la implementación del método pirolítico en la empresa mejoraría su competitividad en el mercado por su enfoque en tecnologías limpias?

Nota: Elaborado por el autor.

La operacionalización de variables, como se observa en la tabla 16, organiza los ítems en relación a la variable de estudio con sus respectivo indicador y dimensión donde se agrupan las preguntas o actividad, para la variable independiente (método pirolítico) se establecen acciones para conseguir un diseño de forma eficiente, mientras que, la variables dependiente (reciclaje de residuos industriales) señala las interrogantes involucradas en la recolección de datos mediante una encuesta dirigido a la muestra escogida que son 20 trabajadores de la empresa Cartonera Orense, mediante un cuestionario con una escala de intervalo.

## 2.10. Plan de análisis e interpretación de datos.

En base a la tabla 17, se elabora un plan de análisis en donde se describen los procedimientos, instrumentos y los resultados esperados en cada uno de los objetivos específicos.

**Tabla 17.**

*Plan de análisis e interpretación de resultados.*

Nº	Objetivos específicos	Procedimientos	Instrumentos	Resultados Esperados
1	<b>Objetivo 1:</b> realizar un estado del arte a partir del análisis de documentación y literatura científica para la obtención de información sobre el tratamiento de residuos industriales.	1. Revisión bibliométrica. 2. MCDM.	1. VosViewer. 2. Proceso jerárquico analítico (AHP)	1. Tendencias y red colaborativas del campo científico con relación al tema. 2. Identificación de técnicas e instrumentos para aplicación.
2	<b>Objetivo 2:</b> desarrollar un enfoque metodológico mediante técnicas e instrumentos de recolección de datos para el análisis de los residuos generados por la empresa de estudio.	1. Proceso metodológico. 2. Plan de recolección de datos. 3. Proceso de validación por expertos.	1. Técnicas e instrumentos de recolección de datos. 2. Panel de expertos. 3. Cuestionario de preguntas cerradas.	1. Selección de población y muestra. 2. Validación de contenido de instrumento. 3. Diseño de método pirolítico.
3	<b>Objetivo 3:</b> describir los resultados del método pirolítico a través de la elaboración del proceso en programas pertinentes para su viabilidad en la conversión de residuos en la empresa cartonera Orense.	1. Desarrollo de plan de recolección de datos. 2. Métodos de desarrollo de modelado. 3. Validación de los datos.	1. Programa IBS SPSS 25. 2. Prueba de Kolmogorov-Smirnov. 3. AutoCAD.	1. Tabulación de resultados de técnica. 2. Elaboración de diseño pirolítico 3. Ejecución de diseño estructural

Nota: Elaborado por el autor.

El plan de análisis e interpretación de datos se estructura de acuerdo con tres objetivos específicos, cada uno con procedimientos detallados, instrumentos seleccionados y resultados esperados, permitiendo un abordaje riguroso y sistemático en la investigación sobre residuos industriales y su aprovechamiento mediante pirólisis.

Para el primer objetivo, se enfocó en la elaboración de un estado del arte sobre desechos industriales, se realiza un análisis bibliográfico, utilizando la herramienta vosviewer para detectar tendencias y redes de colaboración en el campo científico. De manera complementaria, se empleó el proceso de análisis jerárquico (AHP) como método de MCDM para escoger y ordenar técnicas e instrumentos que han probado su utilidad en el manejo de desechos industriales. Esto facilitó un entendimiento de la problemática a escala mundial y las estrategias actuales en su administración.

El segundo objetivo se enfoca en la creación de un enfoque metodológico robusto que simplifique la recopilación de datos pertinentes para la investigación. Este propósito comprende un procedimiento metodológico que incluye técnicas de recolección particulares, garantizando representatividad en la población y la muestra. A partir del equipo de expertos seleccionado para la validez del instrumento determinado por interrogantes cerradas con el final de la elaboración de un diseño que apoye al método pirolítico adecuado a la empresa.

El tercer objetivo, centrado en el desarrollo del proceso de pirólisis, utiliza un programa informático para determinar los parámetros de funcionamiento. El esquema de recolección de datos primero facilita la tabulación de los resultados en el programa IBM SPSS 25 y realiza una prueba de Kolmogorov-Smirnov para evaluar la distribución de las respuestas relacionadas con la variable dependiente (reciclaje de residuos industriales). Como último, se elabora el diseño pirolítico de forma gráfica por AutoCAD, donde se grafica las operaciones necesarias en la conversión de los residuos de la empresa cartonera como una fuente de bioenergía con relación a los datos conseguidos en los estadísticos obtenidos.

## **2.11. Recapitulación del capítulo II.**

El capítulo dos presenta el marco metodológico del estudio, cuyo propósito es crear un enfoque que facilite la elección de técnicas e instrumentos de recolección de datos para proporcionar soluciones sustentables. Se emplea un método cuantitativo, que emplea cifras y criterios objetivos para examinar datos presentes, simplificando la toma de decisiones y la búsqueda de vínculos causales. Se optó por un diseño no experimental de tipo transversal para el diseño del método pirolítico, que posibilita observar variables sin alteraciones y lograr una descripción de estas en un instante específico, tratando fenómenos como percepciones y actitudes dirigido a los trabajadores del departamento de ambiente de la empresa de estudio, esta muestra es obtenido mediante un muestro probabilístico que se aplica un método deductivo para la recolección de datos.

El esquema de recopilación de datos contiene interrogantes fundamentales acerca del contexto y los procedimientos empleados. Se utilizan encuestas estructuradas y análisis de contenido y los expertos verifican los criterios para garantizar la idoneidad del método seleccionado. El instrumento principal fue un cuestionario con preguntas cerradas, cuyo análisis se realizó mediante el software IBM SPSS 25 y aplicando la prueba de Kolmogorov-Smirnov para determinar la distribución de las respuestas con relación a la variable dependiente. Finalmente, se realizó un diseño del proceso en AutoCAD para optimizar los parámetros operativos en la conversión de residuos a bioenergía.

# CAPÍTULO III

## MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Marco de resultados.

#### 3.1.1. Fase 1: revisión sistemática.

Mediante el estado del arte proporcionó una visión de la evolución de la investigación en el área. El estudio de la distribución temporal de las publicaciones mostró un aumento en el interés académico, especialmente en 2024, lo cual subraya una creciente atención a las variables evaluadas. Aunque 2025 se encuentra en sus etapas iniciales, ya muestra un enfoque activo de los investigadores en este campo. Con la elaboración de la revisión bibliométrica se dio un aporte sobre el campo científico y sus interacciones entre los artículos seleccionados, además que se estableció que las principales técnicas a utilizar son TG (análisis termogravimétrico) y PL (pirólisis), y para los instrumentos son PL1 (equipos de laboratorio), TG1 (analizadores termogravimétricos) y AC1 que son (herramientas de modelado).

#### 3.1.2. Fase 2: descripción de los datos.

##### **Descripción de la empresa.**

Para la empresa Cartonera Orense, que tiene como principal línea de producción a la elaboración de cajas de cartón corrugado. Esta empresa tiene un total de 12 años en el sector cartonero en donde ha ofrecido una lista de soluciones para las industrias del sector bananeros, pesquero, de flores, para el consumo masivo y para productos de diferentes medidas. Sin embargo, la empresa también busca que sus actividades se realicen de forma sostenible por medio de los avances tecnológicos. Además, se brindan servicios de consultoría y formación en el lugar para asegurar el adecuado manejo de los empaques.

El sitio de investigación está situado en la provincia de El Oro, Ecuador, concretamente en la av. 25 de junio, Km 4.5, en la ruta Pasaje, El Cambio. Este lugar geográfico está ubicado en una longitud de 3.28927 °S y una latitud de 79.90865 °W, lo que le otorga una ubicación estratégica en la zona. La ubicación permite el acceso a múltiples rutas de transporte, lo que la convierte en perfecta para actividades industriales y comerciales que necesitan conectividad y cercanía a núcleos urbanos y zonas de crecimiento económico en la provincia, tal como se muestra en la figura 15.

**Figura 15.**

*Ubicación de la empresa Cartonera Orense.*

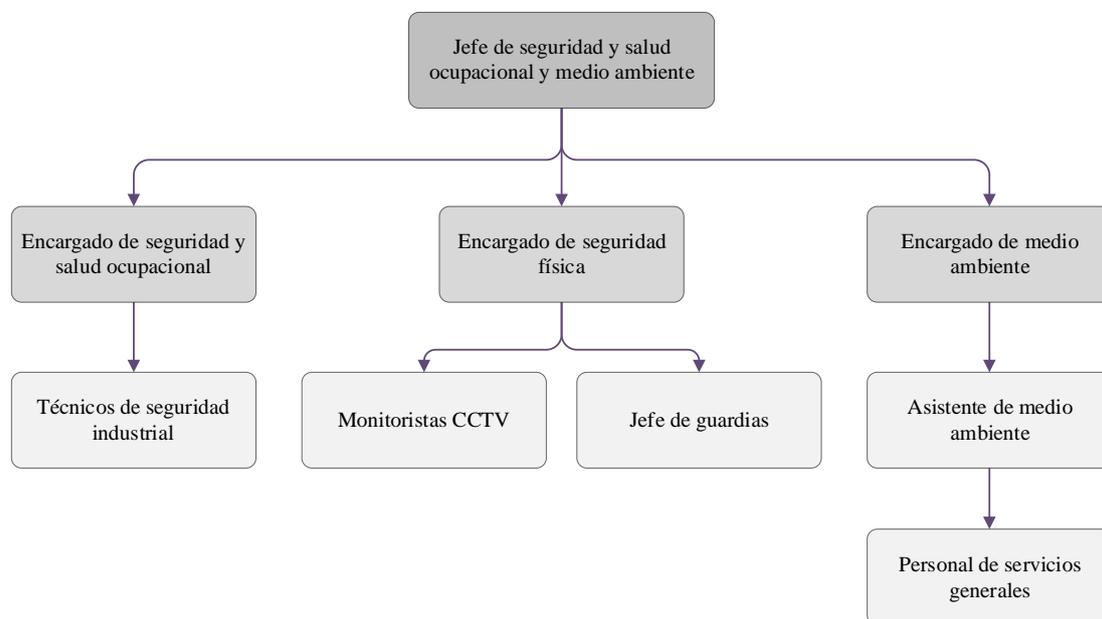


Nota: Obtenido mediante Instituto Geográfico Militar, (2023).

**Organigrama de departamento (SSO y medio ambiente).**

**Figura 16.**

*Organigrama del departamento.*



Nota: Elaborado por el autor.

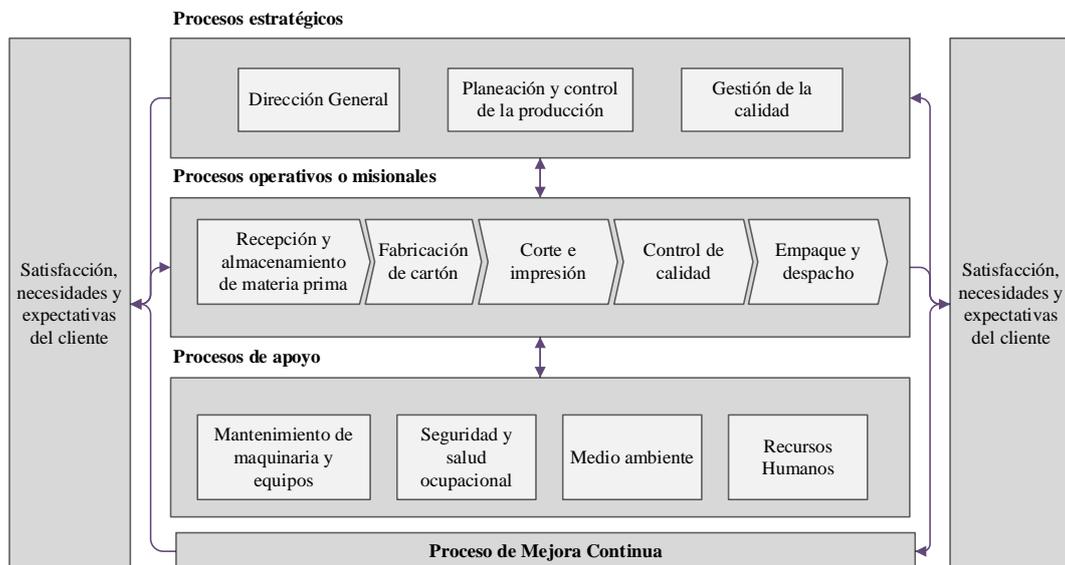
Para la figura 16, se elabora un organigrama sobre el departamento de seguridad, salud ocupacional y medio ambiente, en donde se estructura los distintos cargos involucrados, este inicia el jefe del departamento que busca que las tareas se realicen de la mejor forma, este

divide en tres secciones a sus supervisores, que son quienes aplican los diferentes protocolos de cada área en temas sobre prevención y salud para los trabajadores. También, se tiene en cuenta al departamento de seguridad física que involucra en la vigilancia de las instalaciones para mantener una supervisión directa. Como último, se encuentra el departamento de medio ambiente con su respectivo encargado que buscan soluciones y aplicativos para los diferentes procesos para que mantenga el cumplimiento de las normativas medio ambientales, además está el personal de servicio generales que colabora con esta misma área para procesos de mantenimiento en la mayor parte del tiempo.

### Mapa de procesos de empresa.

**Figura 17.**

*Mapa de procesos.*



Nota: Elaborado por el autor.

Se entiende que en la figura 17, cada fase del proceso, desde la recepción de materia prima hasta la producción y el almacenamiento final de productos, resulta en una interdependencia entre áreas operativas y de soporte, optimizando recursos y minimizando tiempos de inactividad. La coordinación entre departamentos resulta de alta importancia para mantener estándares de calidad, en la garantía la seguridad operativa y en la reducción de desperdicios, lo que a su vez refuerza el compromiso de la empresa hacia prácticas sostenibles y de eficiencia en la conversión de residuos industriales.

### 3.1.3. Validez de instrumento

Para la validación del instrumento se establece mediante criterio de juicios de expertos seleccionados como se observa en el (anexo C), para la selección de los participantes se determinan una serie de criterios de inclusión y de exclusión como se observa en la tabla 18.

**Tabla 18.**  
*Criterios de inclusión y exclusión de expertos.*

N°	Criterios	
	Inclusión	Exclusión
1	Profesionales académicos.	Profesionales con estudios de tercer nivel o inferior.
2	Profesionales con experiencia en el área ambiental.	Personas sin experiencia en la industria cartonera.
3	Estudios de cuarto nivel o superior.	Docentes de facultades no relacionadas.
4	Profesionales con conocimiento en redacción científica.	Profesionales con menos de 20 años de experiencia.
5	Docentes de la carrera de ingeniería industrial.	Profesionales con especialización en área no relacionadas.
6	Investigación con publicaciones en el ámbito ambiental.	

Nota: Elaborado por el autor.

En base a la tabla 18, se establecen una serie de criterios para la inclusión de profesionales que permitan una mejor validez del instrumento como es la adquisición de un nivel académico alto, sobre todo que tengan un mínimo de cuarto nivel, y del conocimiento amplio de la industria cartonera, en procesos industriales y medio ambiente, además de la experiencia de la redacción científica, todo esto para una correcta ejecución del método de recolección de datos.

Por otro lado, se excluyeron perfiles sin experiencia en la industria cartonera o con una formación inferior a tercer nivel, así como aquellos profesionales cuya trayectoria académica o especialización se orienta hacia áreas no relacionadas. Esta selección precisa garantiza que la validación esté respaldada por juicios expertos de alta credibilidad y pertinencia técnica.

**Tabla 19.***Expertos seleccionados para validez de instrumento.*

Experto	Profesión	Nivel de profesión	Sinergia
1	Ingeniero Industrial		Experiencia en gestión ambiental
2	Ingeniero Industrial	MsC.	Conocimiento en el área de procesos de cartón
3	Ingeniero Ambiental		Experiencia en medio ambiente
4	Doctor en Educación	PhD.	Conocimiento en redacción científica
5	Ingeniero Industrial		Profesional con publicación en el área ambiental

Nota: Elaborado por el autor.

En relación a la tabla 18, se ha elegido a un total de 5 expertos que en su mayoría tienen como profesión el título de ingeniero industrial, y uno con un doctorado de educación, por lo tanto, se demuestra la calidad del proceso de validación del instrumento de recolección de datos, además estas personas tienen una relación con la investigación por su amplia experiencia en la gestión ambiental, un extenso conocimiento sobre el proceso de la industria de cartón, además que tiene habilidad en la detección de una correcta redacción de instrumentos de recopilación de datos y también han aportado con artículos de publicación en el ámbito ambiental.

La validez del instrumento refleja una congruencia sólida entre los elementos evaluados y los criterios de valoración establecidos. A través de los puntajes otorgados por los cinco expertos en cada criterio, se observa una alta consistencia en las calificaciones asignadas, lo que indica una adecuada correspondencia entre las dimensiones, indicadores, ítems y opciones de respuesta del cuestionario como se observa en la tabla 20.

**Tabla 20.***Resultados obtenidos de validez por expertos.*

Criterio	Expertos				
	1	2	3	4	5
Relación entre la variable y la dimensión.	5	5	5	5	5
Relación entre la dimensión y el indicador.	10	9	10	9	9
Relación entre el indicador y el ítem.	20	21	21	20	19
Relación entre el ítem y la opción de respuesta.	21	21	21	21	21

Nota: Elaborado por el autor.

Como interpretación de los resultados, el primer criterio: relación entre la variable y la dimensión, todos los expertos otorgaron la máxima puntuación (5), lo cual sugiere que la estructura general del instrumento está bien alineada con la variable de estudio. En el criterio de relación entre dimensión e indicador, se consigue que las calificaciones estén entre 9 a 10

que implica una fuerte relación entre estas secciones y es necesario de una mejor estructuración como indican los expertos. Para el criterio N° 3 que busca la relación entre indicador e ítems, se consiguen puntuaciones de 19 a 21, esto conlleva a que es necesaria la modificación o reajustes en varios ítems para que se refleje una relación fuerte para el instrumento. Sin embargo, existen algunas pequeñas diferencias que puede explorar para mejorar la precisión de los elementos. Como último el criterio relación entre el ítem y la opción de respuesta alcanzó la máxima calificación (21) en todos los casos, lo cual evidencia que las opciones de respuesta están adecuadamente diseñadas para captar la información buscada de manera clara y coherente, sin embargo, se tiene en cuenta los ítems a corrección.

Por lo tanto, los resultados sugieren que el instrumento cumple con los estándares de validez esperados, presentando una estructura aceptable y con una alta capacidad para la recolección de datos en la investigación.

#### 3.1.4. Resultados del instrumento de recolección de datos.

Con la ejecución del plan de recolección de datos, a partir de los 21 ítems establecidos en el instrumento, los resultados son agrupados por sus respectivas dimensiones (anexo B).

- **Dimensión 1: conocimiento sobre el reciclaje de residuos.**

**Tabla 21.**

*Resultados obtenidos de dimensión 1.*

#	Ítems	Preguntas			
		P.1	P.2	P.3	P.4
1	Sí	75%	80%	95%	70%
2	No estoy seguro	0%	0%	5%	15%
3	No	25%	20%	0%	15%

Nota: Elaborado por el autor mediante Google Forms.

En la tabla 21, los resultados de la dimensión conocimiento sobre el reciclaje de residuos indican que, en general, la mayoría de los participantes son instruidos por la empresa sobre el reciclaje de los residuos de cartón y papel. En la pregunta 1, el 75% señaló que sí posee conocimientos acerca de las técnicas de reciclaje utilizadas, lo que constituye una robusta base de conocimiento para los trabajadores. Sin embargo, el 25% señaló que no las entiende, lo cual sugiere que, tal vez, el método de comunicación y/o capacitación en técnicas de reciclaje no es adecuado o no llega a todos los trabajadores de forma justa.

En relación con la consulta acerca de la cantidad de desechos reciclados descrito en la pregunta 2, el 80% de los trabajadores contestó de forma afirmativa. Por lo tanto, a pesar de que las compañías podrían sostener que están proporcionando a los trabajadores la información

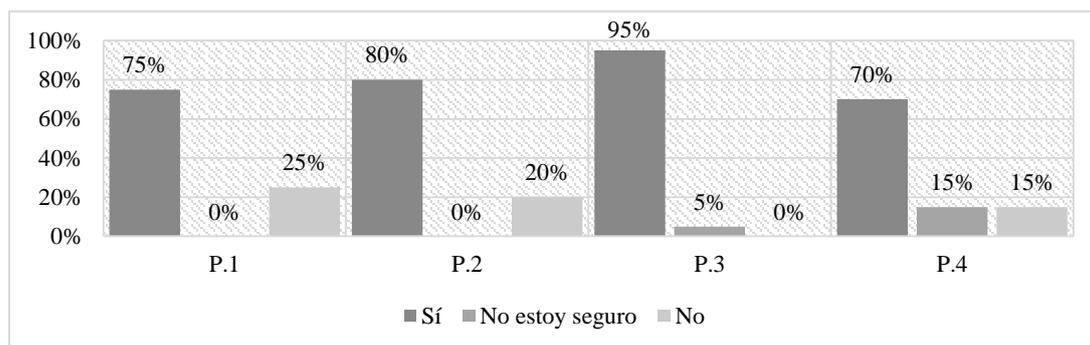
correcta acerca del reciclaje de desechos, el 20% manifestó que no, lo que indica que existe la posibilidad de que exista más información para ellos.

Respecto a la información sobre el destino final de los residuos no reciclados realizado en la pregunta 3, un 95% expresó estar informado, lo que demuestra que la utilización de estos materiales es ampliamente reconocida entre los trabajadores, reforzando así el compromiso con la transparencia y la rastreabilidad en la gestión de residuos.

Finalmente, en la consulta acerca de las ventajas medioambientales del reciclaje visualizada en la pregunta 4, el 70% manifestó saber los efectos beneficiosos, mientras que el 15% no está seguro y otro 15% no tiene datos acerca de ello. Este hallazgo indica la posibilidad de fortalecer la conciencia acerca del efecto positivo en el medio ambiente del reciclaje, lo que podría potenciar la motivación y la dedicación hacia las prácticas sustentables.

**Figura 18.**

*Diagrama de resultados de dimensión 1.*



Nota: Elaborado por el autor.

La figura 18 muestra que la primera dimensión muestra un sólido entendimiento entre los participantes en la encuesta, aunque existen áreas que necesitan mejora en la divulgación de ciertos aspectos particulares de la administración de desechos.

- **Dimensión 2:** procedimientos de reciclaje y su eficiencia.

**Tabla 22.**

*Resultados obtenidos de dimensión 2.*

#	Ítems	Preguntas			
		P.5	P.6	P.7	P.8
1	Sí	75%	50%	95%	80%
2	No estoy seguro	0%	20%	0%	0%
3	No	25%	30%	5%	20%

Nota: Elaborado por el autor mediante Google Forms.

Con relación a la tabla 22, se obtiene para la dimensión procedimientos de reciclaje y su eficiencia, ha demostrado un escenario sobre la perspectiva en base a la eficiencia y al control de los procesos de reciclaje. Se comprende en la pregunta 5, que el 75% de los trabajadores indica que el proceso de reciclaje actual tiende a ser eficiente, sin embargo, el porcentaje restante señala lo contrarios, resaltando que puede tener mejorar futuras.

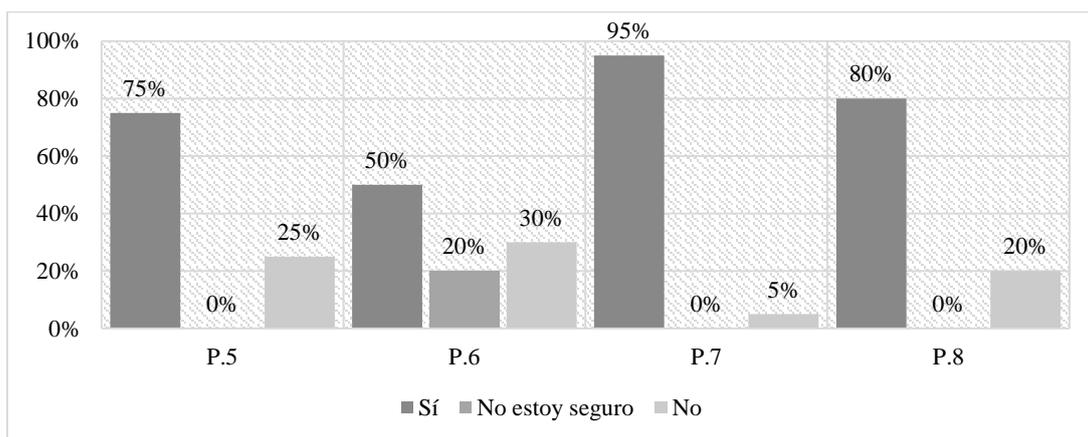
Para la pregunta 6, que está enfocada en que, si la empresa consigue un óptimo reciclaje, se anunció que el 50% de los encuestados, resaltan que se cumple de forma efectiva, pero 30% señala que no se realiza de manera correcta y es necesario mejoras inmediatas a este proceso y el 20% responde de forma indiferente, lo que resulta de la posibilidad que se establezca un método de reciclaje de mayor eficiente posible.

En base a la pregunta 7 se consigue que un total del 95% de los trabajadores tienen una seguridad que se cumplen con las normas ambientales, esto es por motivo que la empresa sigue normativa para evitar problemas futuros, sin embargo, también, es necesario establecer mejorar para mantener este cumplimiento.

Para la pregunta 8 de esta dimensión, han respondido de forma afirmativa se apliquen controles para una reutilización y la necesidad de someter supervisión estricta, por otro lado, el 20% señala la necesidad de conseguir un mejor control de los procedimientos para el reforzamiento de los posibles críticos existentes de este proceso en específico.

**Figura 19.**

*Diagrama de resultados de dimensión 2.*



Nota: Elaborado por el autor.

A partir de la figura 19, se otorga un resultado que tiene como dirección a la aplicación de un sistema de reciclaje que sea eficiente bajo normativas, además que el residuo tenga un mejor aprovechamiento.

- *Dimensión 3: impacto ambiental del reciclaje.*

**Tabla 23.**

*Resultados obtenidos de dimensión 3.*

#	Ítems	Preguntas			
		P.9	P.10	P.11	P.12
1	Sí	90%	60%	75%	40%
2	No estoy seguro	0%	5%	10%	10%
3	No	10%	35%	15%	50%

Nota: Elaborado por el autor mediante Google Forms.

La tabla 23 muestra que, a pesar del énfasis en el área temática de sensibilización, los hallazgos en la dimensión: impacto ambiental del reciclaje, indican una evaluación positiva del impacto ambiental del reciclaje en las empresas. En la pregunta 9, el 90% de los participantes afirmó que el reciclaje de residuos industriales reduce el impacto ambiental de las comunidades locales, el 10% afirmó lo contrario y, en general, no hubo consenso sobre la contribución del reciclaje a nivel local, por lo tanto, se evidencia un reconocimiento positivo.

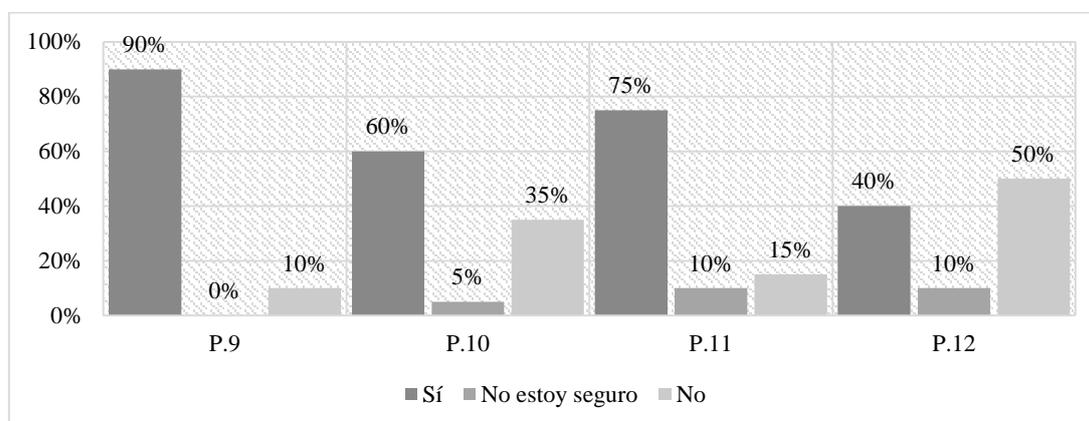
Para la pregunta 10, que resalta donde la adecuada gestión de los residuos que son los lodos cartoneros, en donde se obtiene que el 60% de los encuestados han asegurado que con el sistema actual logra a que se gestionen los residuos, sin embargo, el 35% tiene una respuesta contraria y el 5% se encuentra indiferente a esta interrogante, lo que implica que existe una efectividad con el reciclaje, pero no se logra a que todos los trabajadores tengan una conocimiento sobre beneficios con una mayor efectividad.

Para la pregunta 11, se consigue que los desechos mediante un correcto sistema de gestión que permita que la huella de carbono se reduzca, en otro lado, el 75% de los encuestados afirman de forma positiva que se aplique un método que permita una acción inmediata a este aspecto. Aunque, se tiene al 15% que refleja una discrepancia a esta pregunta y el restante (10%) se mantiene con dudas sobre estas acciones, por lo tanto, el tema de la huella de carbono es considerado importante, pero se debe impulsar el conocimiento de la huella de carbono dentro de la empresa.

Por último, en la pregunta 12, sobre el rol del reciclaje de lodos residuales en la conservación de recursos naturales, únicamente el 40% piensa que aporta a este fin, mientras que un 50% difiere y un 10% no posee una postura definida. Este hallazgo señala una ausencia de acuerdo sobre los beneficios ecológicos particulares del reciclaje de lodos, lo que se podría tratar a través de estrategias de formación y administración más perceptibles.

**Figura 20.**

*Diagrama de resultados de dimensión 3.*



Nota: Elaborado por el autor.

Los resultados de la figura 20, reflejan un alto nivel de valoración del reciclaje en términos de impacto ambiental, pero con ciertas áreas de percepción diferenciada sobre sus beneficios específicos.

- **Dimensión 4:** aplicación del método pirolítico.

**Tabla 24.**

*Resultados obtenidos de dimensión 4.*

#	Ítems	Preguntas			
		P.13	P.14	P.15	P.16
1	Sí	70%	65%	75%	95%
2	No estoy seguro	5%	10%	0%	5%
3	No	25%	25%	25%	0%

Nota: Elaborado por el autor mediante Google Forms.

Para la tabla 24, se agrupan las preguntas de la dimensión: utilización del método pirolítico, donde se obtuvo que el reciclaje de los lodos residuales para la empresa tiene una alta apreciación sobre la tecnología, sin embargo, existe incertidumbre en la misma. Al detallar la pregunta 13, se obtuvo que el 70% de los colaboradores afirma que el uso de los métodos pirolíticos es una alternativa para un eficiente proceso de reciclaje de los lodos, pero existe un 5% que no está convencido de estos métodos, y existe una negativa alta del 25%. Por lo que resalta una percepción positiva pero que debe de ser mejor explicado para su mejor comprensión.

Respecto a la pregunta 14, se obtiene que un 65% argumenta que la pirólisis tiene el potencial de transformar eficientemente los lodos en productos reutilizables, aunque un 25%

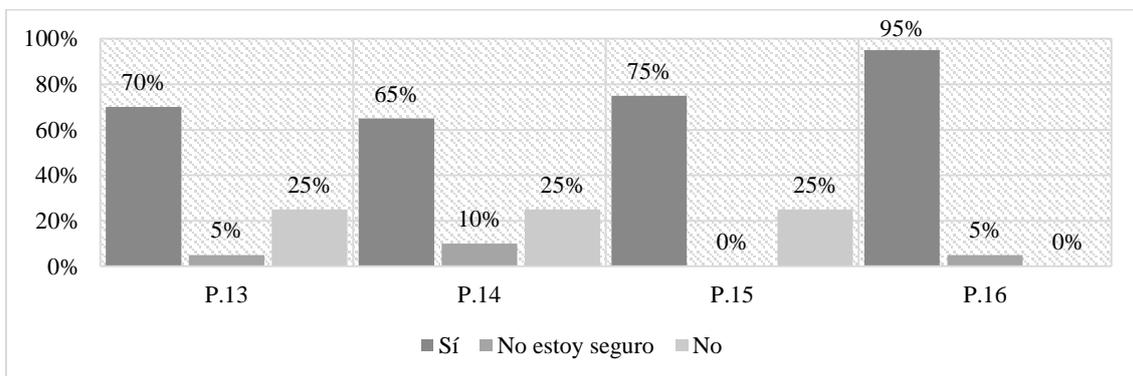
persiste en su duda y un 10% se halla inseguro ante esta pregunta. Este descubrimiento subraya la importancia de la capacidad de la pirólisis para la evaluación de los residuos, aunque también se demuestra la necesidad de la obtención de más información técnica o evidencias sobre su alto potencial de transformación.

Con relación a la pregunta 15, se consigue que el 75% de los trabajadores consideren aceptable la aplicación de un sistema pirolítico que utilice a los residuos como una fuente de energía para la empresa, sin embargo, el porcentaje restante se expresa de forma contraria, todo esto indica una perspectiva positiva sobre estos nuevos métodos, pero la falta de conocimiento implica que no se llegue a un acuerdo al 100% o que reservan dar una respuesta segura.

Para la pregunta 16, se obtiene que el 95% señala que el método pirolítico reduce los costos destinados en el almacenamiento de los residuos y el 5% mantiene una respuesta contradictoria. Esto, a simple vista, resalta a que hay una alta aprobación en su capacidad de reducción de costos en el almacenamiento de los desechos.

**Figura 21.**

*Diagrama de resultados de dimensión 4.*



Nota: Elaborado por el autor.

Para la figura 21, se tiene que las respuestas son afirmativas y con un bajo porcentaje de negatividad, es decir, que la mayoría de los trabajadores señalan el uso de métodos que sean eficiente para la gestión de los residuos y de su respectivo almacenamiento.

- **Dimensión 5: percepción del método pirolítico.**

**Tabla 25.***Resultados obtenidos de dimensión 5.*

#	Ítems	Preguntas				
		P.17	P.18	P.19	P.20	P.21
1	Sí	80%	80%	30%	45%	80%
2	No estoy seguro	5%	10%	20%	20%	15%
3	No	15%	10%	50%	35%	5%

Nota: Elaborado por el autor mediante Google Forms.

Los hallazgos de la tabla 25 en la dimensión: percepción del método pirolítico, destacan, una apreciación favorable hacia la inversión en esta tecnología para la gestión de desechos industriales, aunque existen algunas preocupaciones respecto a su puesta en práctica. En base a la pregunta 17, indica que el 80% de los participantes en la encuesta brinda un apoyo positivo para la utilización de tecnologías de pirólisis para el tratamiento de residuos de cartón y papel, sin embargo, con un 15% que lo desacredita y un 5% que aún conserva preocupaciones. Con lo indicado, se demuestra un alto nivel de aceptación hacia la actualización en la gestión de residuos mediante tecnología avanzada.

En la cuestión con la pregunta 18, el 80% coincide en que la pirólisis puede ser una alternativa sustentable para el manejo de desechos, con un 10% de incertidumbre y un 10% de discrepancia. Esta información fortalece la visión de la pirólisis como una opción interesante dentro de los objetivos medioambientales de la compañía.

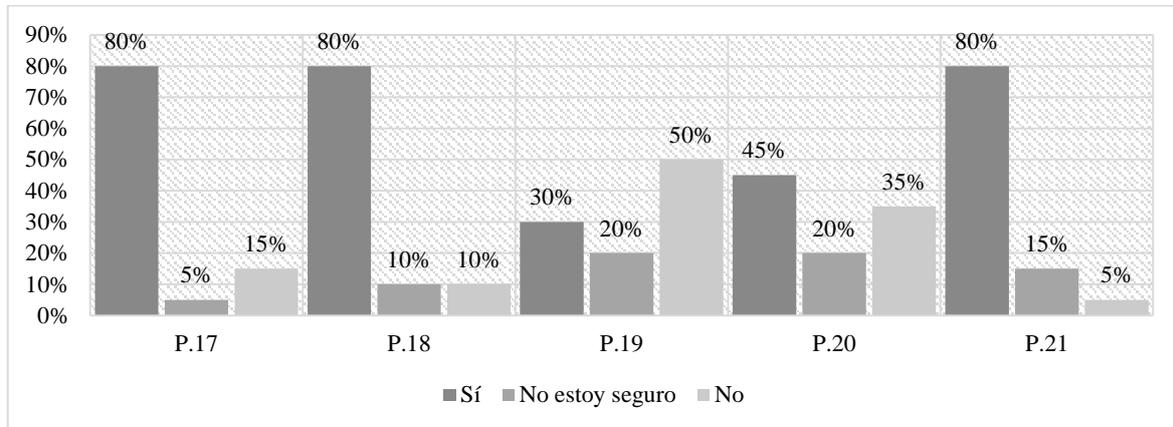
No obstante, en la cuestión de la pregunta 19, únicamente el 30% coincide en que la implementación de esta tecnología necesita de una formación especializada, mientras que el 50% no ve necesario tal entrenamiento y el 20% se mantiene incierto. Este hallazgo indica que, pese a que se valora la tecnología, hay un nivel considerable de infravaloración respecto a los requerimientos de capacitación técnica que la pirólisis podría demandar.

Respecto a la pregunta 20, se obtiene que el 45% de encuestados indica que un proceso de pirólisis para los residuos de la empresa llegase a permitir una mejor responsabilidad ecológica, pero el 35% no considera a que sea la forma adecuada de conseguir estos aspectos y como último, el 20% está inseguro ante esta pregunta, sin embargo, se conocer a que los trabajadores buscan que la empresa mejore su imagen al ser sostenible, pero la percepción es muy variante.

La pregunta 21, se tiene otros resultados, en donde el 80% si refleja que los métodos pirolíticos permiten que la empresa sea más competitiva, mientras que el 15% responde de forma contraria y el 5% decide una respuesta indiferente, esto se analiza a que se tiene un acuerdo a que las propuestas permitan un alto beneficio a la competitividad de la empresa.

**Figura 22.**

*Diagrama de resultados de dimensión 5.*



Nota: Elaborado por el autor.

En relación con la figura 22, los resultados señalan una percepción positiva sobre la pirólisis, pero se demuestran áreas de mejora en la preparación organizacional y la expectativa de los beneficios ambientales de esta propuesta.

### **3.1.5. Fiabilidad del instrumento.**

El coeficiente alfa de Cronbach es una medida de la confiabilidad de un instrumento de evaluación, particularmente en términos de su consistencia interna, donde se calcula a partir de la varianza de los ítems individuales y la varianza de la suma de los ítems de cada participante. Un aumento en el valor del alfa al eliminar un ítem indica que dicho ítem no se correlaciona adecuadamente con los demás de la escala. Los valores del coeficiente alfa de Cronbach oscilan entre -1 y 1, donde los valores negativos indican correlaciones negativas entre ítems, y los valores positivos aceptables van desde 0.65 hasta 0.80, siendo considerados adecuados (Toro et al., 2022).

Para el desarrollo del coeficiente de alfa de Cronbach se utiliza el programa estadístico IBM Statistic SPSS 25 (anexo D), donde se registran los ítems del instrumento de recolección de datos elaborado, con un total de 21 casos válidos para el cálculo de la fiabilidad como se observa en la tabla 26.

**Tabla 26.**  
*Datos procesados de instrumento.*

<b>Resumen de procesamiento de casos</b>			
		<b>N</b>	<b>%</b>
Casos	Válido	21	100,0
	Excluido	0	,0
	Total	21	100,0

a. La eliminación por lista se basa en todas las variables del procedimiento.

Nota: Obtenido mediante programa SPSS 25.

Un alfa de Cronbach de 0,820 para el conjunto de 21 ítems del instrumento de recolección de datos. Este valor de alfa de Cronbach indica un nivel de consistencia interna alto, dado que se encuentra por encima del umbral de 0,7, comúnmente aceptado como el mínimo para considerar un instrumento como fiable como se observa en la tabla 27.

**Tabla 27.**  
*Resultado de alfa de Cronbach.*

<b>Estadísticas de fiabilidad</b>	
Alfa de Cronbach	N de elementos
,820	21

Nota: Obtenido mediante programa SPSS 25.

**Tabla 28.**  
*Rangos y magnitud de alfa de Cronbach.*

<b>Rangos</b>	<b>Magnitud</b>
$a > 0.9$	Muy alta
$0.9 > a \geq 0.8$	Alta
$0.8 > a \geq 0.7$	Moderada
$0.7 > a \geq 0.5$	Baja
$0.5 > a$	Muy baja

Nota: Obtenido mediante programa SPSS 25.

Con respecto a la tabla 28, se comprende que un coeficiente de 0,820 que está en el rango de  $0.9 > a \geq 0.8$  que se considera de magnitud alta, lo que sugiere que los ítems evaluados en el cuestionario presentan una adecuada correlación entre sí, lo cual es indicativo de que los elementos dentro del instrumento miden de manera consistente el mismo constructo subyacente. En otras palabras, los hallazgos obtenidos han confirmado la validez del instrumento, señalando que las cuestiones propuestas encapsulan de manera consistente y constante las dimensiones del análisis sobre los procesos pirolíticos en la empresa.

### 3.1.6. Verificación de hipótesis.

En otras palabras, los hallazgos obtenidos han confirmado la validez del instrumento, señalando que las cuestiones propuestas encapsulan de manera consistente y constante las dimensiones del análisis sobre los procesos pirolíticos en la empresa. En algunos artículos, por ejemplo, solo se plantea la hipótesis de investigación, mientras que en otros únicamente se menciona la hipótesis nula (Hernández & Mendoza, 2018).

La prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS) se emplea para comparar dos distribuciones y determinar si provienen de la misma distribución subyacente. Esta prueba, derivada de la estadística, es no paramétrica, lo que le permite funcionar con cualquier tipo de distribución. No se limita a distribuciones conocidas como la normal o la binomial; puede aplicarse a datos de cualquier forma y seguirá siendo efectiva (Campanelli, 2024).

**Hipótesis nula ( $H_0$ ):** la hipótesis nula para la prueba de Kolmogorov-Smirnov generalmente establece que los datos siguen una distribución normal. Es decir:

**$H_0$ :** la propuesta del proceso pirolítico no permite aprovechar de forma eficiente los residuos industriales, generando energía renovable y subproductos de valor.

**Hipótesis alternativa ( $H_1$ ):** se plantea una hipótesis opcional, en caso de que de la hipótesis nula sea rechazada mediante una distribución no normal, como es:

**$H_1$ :** la propuesta del proceso pirolítico permite aprovechar de forma eficiente los residuos industriales, generando energía renovable y subproductos de valor.

#### **Decisión sobre las hipótesis:**

- En caso de que el valor (P) de la prueba sea inferior al límite de significancia (0.05), se descarta la hipótesis nula ( $H_0$ ) y aceptamos la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), lo que señala que los datos no se ajustan a una distribución normal.
- Si el valor p es mayor que 0.05, no rechazamos la hipótesis nula ( $H_0$ ), lo que sugiere que no hay suficiente evidencia para afirmar que los datos no siguen una distribución normal. En otras palabras, se puede aceptar la normalidad de los datos en ese caso.

Los datos descriptivos de los resultados obtenidos de la recolección de datos de cada dimensión establecida (anexo D), se organizan de la siguiente manera a partir del programa SPSS 25 como se observa en la tabla 29.

**Tabla 29.***Datos estadísticos descriptivos del instrumento.*

<b>Estadísticos descriptivos</b>						
	N	Media	Desv. Desviación	Mínimo	Máximo	
D1	20	5,4000	2,01050	4,00	10,00	
D2	20	5,8000	2,09259	4,00	10,00	
D3	20	6,4500	2,37254	4,00	10,00	
D4	20	5,7000	1,75019	4,00	10,00	
D5	20	8,0000	1,74718	5,00	11,00	

Nota: Obtenido mediante programa SPSS 25.

En la tabla 29 los resultados de los estadísticos descriptivos para las cinco dimensiones (D1 a D5) muestran variaciones en la media, desviación estándar, y rangos mínimo y máximo de las puntuaciones obtenidas. La media de D5 es la más alta (8,0000), lo que sugiere una tendencia a puntajes mayores en esta dimensión, en comparación con las otras dimensiones, cuyas medias oscilan entre 5,4000 y 6,4500. Las desviaciones estándar varían, siendo la más alta en D3 (2,37254), lo que indica mayor dispersión de los valores en esta dimensión, mientras que D4 y D5 presentan las desviaciones estándar más bajas, lo que implica menor variabilidad en las respuestas.

Mediante la prueba de normalidad se permite aceptar o rechazar la hipótesis sobre la normalidad de los datos, y según el valor de significancia, como se observa en la tabla 30.

**Tabla 30.***Prueba de normalidad.*

<b>Pruebas de normalidad</b>						
	<b>Kolmogorov-Smirnov<sup>a</sup></b>			<b>Shapiro-Wilk</b>		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
D1	,307	20	,000	,729	20	,000
D2	,255	20	,001	,815	20	,001
D3	,199	20	,037	,840	20	,004
D4	,184	20	,073	,863	20	,009
D5	,216	20	,015	,910	20	,065

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota: Obtenido mediante programa SPSS 25.

Acerca de las evaluaciones de normalidad en las cinco dimensiones del instrumento con el uso de la prueba de Kolmogorov-Smirnov y la prueba de Shapiro-Wilk se ha demostrado que los datos se han ajustado a una distribución normal. En el modelo Kolmogorov-Smirnov, los valores de significancia de las dimensiones D1, D2, D3 y D5 son inferiores a 0,05, correspondientes a 0,000, 0,001, 0,037 y 0,015, respectivamente, lo que indica desviaciones

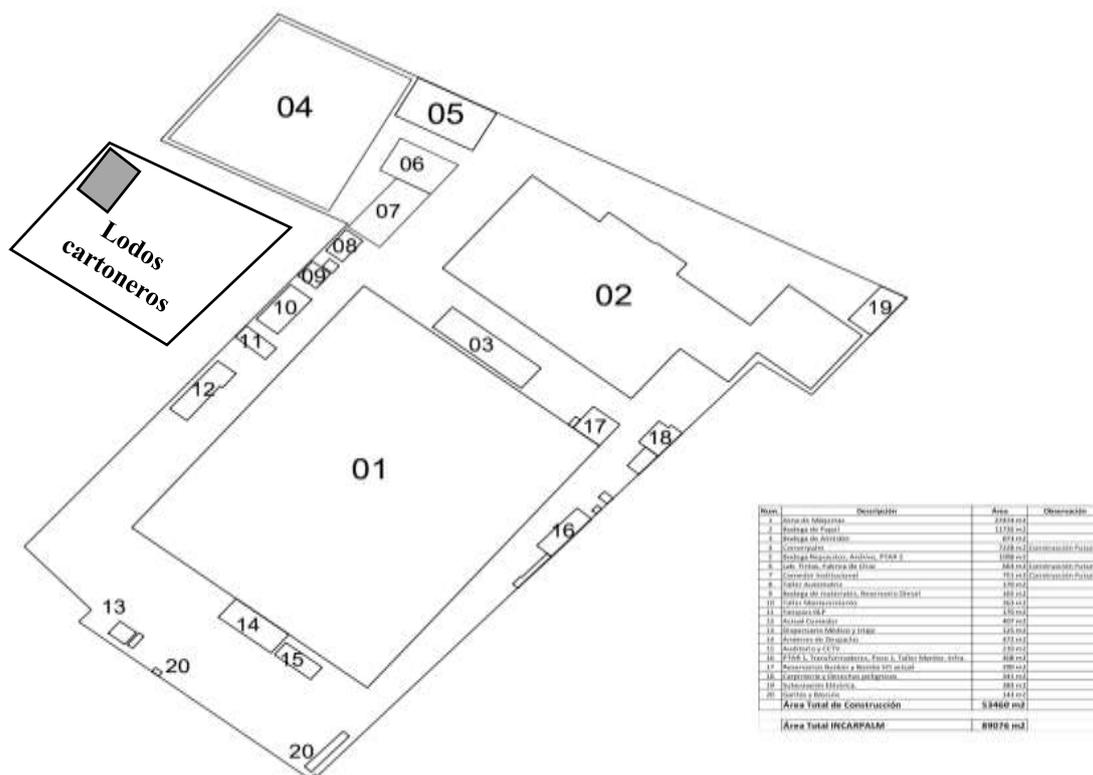
significativas de la normalidad. Para la dimensión 4, se consigue una significación de 0,073 que es cercana a una distribución normal, además que con Shapiro Wilk se demuestra que los resultados están por debajo de 0,05 para cada una de las dimensiones, excepto, por la dimensión 5 que han mostrado datos con una significación de 0,065. Sin embargo, considerando el total de las dimensiones, se evidencia el rechazo de la hipótesis nula ( $H_0$ ) y que se acepta de forma correcta a la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), que resalta una propuesta eficiente para los residuos industriales para generación de energía.

### 3.1.7. Ubicación de lodos de cartón y papel.

La empresa Cartonera Orense, ha llegado aplicar una organización estratégica de sus áreas con el propósito de optimización de la separación y del tratamiento seguro de los desechos producidos. Se limita al espacio del diseño al sector donde se almacena de los lodos de cartón y papel está situado entre la sección 4, llamada Converpalm, y los talleres de mantenimiento, situándose de esta manera a una distancia significativa de las zonas principales de proceso y de los almacenes como se evidencia en la figura 23.

**Figura 23.**

*Distribución de área en empresa Cartonera Orense.*



Nota: Obtenido por Cartonera-Orense, (2024).

Aunque sean un depósito amplio, es debe tener en cuenta que su mayor uso es de almacenamiento de lodos cartoneros procesado, sin embargo, también muestra una alta capacidad para una correcta gestión de los procesos de tratamiento. Además, se ha identificado una sección específica para implementar el proceso de pirólisis propuesto, la cual cuenta con un área de 20 metros de largo por 10 metros de ancho.

### **3.2. Propuesta.**

Diseño de un método pirolítico para reciclar residuos industriales como fuente de energía, empresa Cartonera Orense, Ecuador, 2024.

#### **3.2.1. Introducción.**

En los últimos años, hay una mayor presencia de residuos con una estimación de millones de toneladas a nivel global, esto provoca un mayor impacto al medio ambiente y que la preservación de ecosistemas se vuelva cada vez más compleja, como una opción de forma eficiente en la conversión de desechos a un proceso que permita la obtención de biocombustibles, se presenta a los métodos pirolíticos como señala Moreno et al., (2023). Los combustibles fósiles y la gestión incorrecta de los desechos sólidos representan graves desafíos medioambientales a escala global, en donde se identificado de la necesidad de tecnologías sostenibles que se disminuya la cantidad de los desechos de forma práctica, esto puede impulsar a la economía circular (Sanchez et al., 2023).

En el método de pirólisis, los desechos son sujetos en altas temperaturas en falta de oxígeno, lo que promueve la desintegración térmica de los polímeros y libera elementos gaseosos y vapores que pueden ser empleados para producir combustibles líquidos y gaseosos. Estos productos pueden variar por el tipo de materia prima introducida al proceso, además, de la temperatura y de la exposición del calor durante el proceso como indica Setianingsih et al., (2022). La transformación de la biomasa mediante métodos pirolíticos en una atmósfera inerte, en donde se genera el carbón, gases y líquidos para que se integre por múltiples compuestos orgánicos con oxígeno. Investigaciones indican que, al realizarse a temperaturas inferiores a 500 °C, la biomasa se convierte principalmente en compuestos aromáticos policíclicos y moléculas de bajo peso molecular (Zhang et al., 2023).

Una planta de pirólisis para la empresa Cartonera Orense, situada en la provincia de El Oro, permitiría estimar la capacidad de producción de biochar y bio-oil a partir de los desechos de cartón. Los residuos lignocelulósicos han despertado un creciente interés debido a sus

propiedades mecánicas y térmicas, así como a su disponibilidad renovable, bajo costo, no toxicidad y capacidad de biodegradación (Redondo et al., 2020). Su composición rica en lignanos y celulosa otorga a los residuos agroindustriales un alto potencial como materia prima para procesos de conversión tanto química como biotecnológica.

### **3.2.2. Objetivo general.**

Diseñar una planta de pirólisis de lodos cartoneros mediante la identificación de procesos para la conversión de biochar como fuente de energía en empresa Cartonera Orense, en la provincia de El Oro.

### **3.2.3. Objetivos específicos.**

OBJ1 Analizar la producción de lodos cartoneros mediante la información obtenida de encuesta para el planteamiento de parámetros de los lodos.

OBJ2 Diseñar proceso pirolítico de lodos cartoneros mediante el uso de programas especializados para la empresa Cartonera Orense.

OBJ3 Evaluar el proceso pirolítico a partir de pruebas de laboratorio para el conocimiento de propiedades de poder calorífico del producto final.

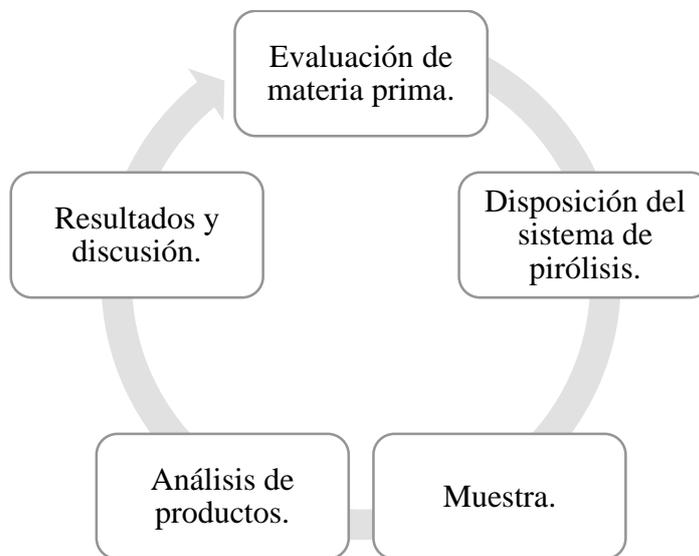
OBJ4 Elaborar un análisis financiero mediante indicadores de inversión para la viabilidad de la propuesta en la empresa de estudio.

### **3.2.4. Metodología.**

Se elabora la metodología para realizar el diseño de proceso pirolítico, en donde se definen una secuencia de fases otorgados en el artículo de Koderá et al., (2021) en relación a la estimación de producción de biochar y gas combustible como se observa en la figura 24.

**Figura 24.**

*Metodología para diseño de proceso pirolítico.*



Nota: Elaborado por el autor en base a Kodera et al., (2021).

Inicia con un proceso de evaluación con el estudio de la materia prima (lodos de cartón), esto con la finalidad de la determinación de los parámetros concretos que son necesarios para el reactor. Se plantean los respectivos pasos para el sistema pirolítico propuesto para la empresa de estudio, en donde se considera los análisis señalados en pruebas.

Entonces, este procedimiento, debe de tener en cuenta las pruebas con el análisis termogravimétrico, en análisis de reducción y en análisis proximal, además de la adquisición de datos sustentados sobre el análisis elemental del biochar generado por el método planteado para la obtención del poder calorífico conseguido de estos residuos de la empresa Cartonera Orense.

Finalmente, en la fase de resultados y discusión, se presentan los hallazgos obtenidos del diseño y se examinan en profundidad para evaluar la eficiencia del proceso pirolítico.

### **3.2.5. Evaluación de materia prima (lodos cartoneros).**

Según Jwaida et al., (2024), establece que las cenizas derivadas de lodos de papel (PSA) se originan como un subproducto al incinerar los lodos residuales de la industria papelera. Este proceso de incineración cumple una doble función: reduce considerablemente el volumen de estos residuos, alcanzando generalmente una disminución del 80-90%, y aprovecha en parte la energía mediante la co-combustión con biomasa. Se ha destacado que los lodos de papel que se han elaborado de manera mecánica se conocen que tiene un poder calorífico bajo, que tiene una oscilación entre 2,5 y 6,0 MJ/kg.

La celulosa, que constituye el 82.19% del cartón transformado en lodo, es el principal elemento que garantiza su estabilidad térmica debido a los enlaces  $\beta$ -14 glicosídicos, lo que le otorga la capacidad de resistir altas temperaturas. La hemicelulosa que constituye el 7.11% de todo el material y también, es la que proporciona una propiedad biodegradable al material. La lignina, componente más resistente, constituye el 7.65%, brindando rigidez estructural. Además, el lodo contiene un 0.92% de cenizas, mientras que los aditivos representan un 2.13% del total, contribuyendo con ciertas propiedades específica como se encuentra detallada en la Tabla 31.

**Tabla 31.**  
*Composición de residuos de cartón corrugado.*

Propiedad	Composición
Celulosa	82.19%
Hemicelulosa	7.11%
Lignina	7.65%
Ceniza	0.92%
Aditivos	2.13%

Nota: Obtenido en base a Xu et al., (2020).

La empresa Cartonera Orense genera en promedio 2 toneladas de residuos de cartón y papel cada 12 horas, alcanzando un total de 4 toneladas diarias. Sin embargo, en escenarios donde ocurren defectos en el proceso de fabricación, la generación de residuos puede elevarse hasta 3.5 toneladas en un mismo intervalo de tiempo como se observa en la tabla 32.

**Tabla 32.**  
*Cantidad de generación de residuos cartoneros.*

Generación	Cantidad de residuos
Residuos generados (promedio)	2 toneladas / 12 horas
Residuos obtenidos (máximo)	3.5 toneladas / 12 horas

Nota: Elaborado por el autor en base a Cartonera-Orense, (2024).

Estos residuos son acumulados en el área especificada para su transformación en lodos cartoneros; sin embargo, actualmente, estos materiales carecen de un aprovechamiento funcional dentro de las operaciones de la empresa, como se observa en la figura 25.

### **Figura 25.**

*Depósito de residuos de cartón y papel.*



Nota: Fotografía obtenida de Cartonera Orense, (2024).

La carencia de un procedimiento que posibilite la valorización de los lodos mediante una tecnología como la pirólisis constituye una oportunidad que es desperdiciada para transformar estos desechos en una fuente energética. La aplicación de un proceso pirolítico no solo favorecería una administración ambientalmente consciente, sino que también posibilitaría la optimización de los recursos al utilizar los desechos producidos, convirtiendo estos en energía que podría ser reincorporada al ciclo de producción, fomentando de esta manera una economía circular en las operaciones de la compañía (anexo F).

### **Figura 26.**

*Tratamiento de residuos a lodos de cartón y papel.*



Nota: Fotografía obtenida de Cartonera Orense, (2024).

En relación con la figura 26, el poder calorífico del lodo de papel y cartón es relativamente alto, situándose generalmente en 17.45 MJ/kg. Este valor es importante para los procesos de la pirólisis, ya que indica el potencial energético que el lodo puede ofrecer como fuente alternativa de energía. Sin embargo, esto dependerá de la cantidad de celulosa y lignina

presentes, el rango se establece entre 14 a 18 MJ/kg, ya que estos compuestos aportan energía cuando se descomponen (Zuhara et al., 2024).

Una prueba de laboratorio comprueba diferentes características del cartón usado para garantizar su rendimiento en la empresa cartonera. La temperatura a la que algo puede incendiarse, llamada punto de inflamación, esta es superior a 60°C, lo que significa que es menos probable que se quemara sin intención. Mientras se indica que, en el desarrollo de la evaluación microbiológica, el laboratorio que realizó a la materia primera, también indica el contenido escaso de coliformes fecales, a 1 NMP/g, lo que indica una disminución de la impureza biológica.

Respecto a la toxicidad, los niveles de metales pesados, tales como selenio, plomo, mercurio, cromo y cadmio, se encuentran bajo los límites catalogados como peligrosos, lo que indica una toxicidad regulada. Además, pesticidas y compuestos tóxicos orgánicos, como el metoxiclor y el heptacloro, también se encuentran en niveles bajos. Por otro lado, la reactividad muestra una generación de cianuro de un total de 5.27 mg/l, esto necesita de un monitoreo en su manejo y tratamiento seguro como se observa en la tabla 33.

**Tabla 33.**  
*Ensayos de lodos cartoneros.*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>
<b>Inflamación</b>	
Punto de inflamación	>60°C
<b>Corrosividad</b>	
Potencial de hidrógeno	6.22 pH
<b>Microbiología</b>	
Coliformes fecales	1 NMP/g
<b>Toxicidad</b>	
Selenio	<0.0635 mg/l
Plomo	<0.0686 mg/l
Mercurio	<0.0364 mg/l
Cromo	<0.0133 mg/l
Cadmio	<0.0767 mg/l
Bario	<0.0184 mg/l
Arsénico	<0.2660 mg/l
Methoxychlor	<0.0737 mg/l
Heptachlor epóxido	<0.05 mg/l
Heptachlor	<0.007 mg/l
Endrin	<0.01 mg/l
<b>Reactividad</b>	
Generación de cianuro	5.27 mg/l

Nota: Obtenida de Cartonera Orense, (2024).

Estos resultados sugieren que los lodos podrían ser aptos para su uso en procesos de pirólisis, siempre que se mantenga un control sobre sus características químicas y microbiológicas.

- **Análisis proximal de lodos cartoneros.**

El análisis proximal realizado a una institución especializada, sobre una muestra de lodo cartonero sometida a una temperatura de 700 °C arrojó resultados que permiten evaluar su comportamiento térmico y composición como se indica en la tabla 34.

**Tabla 34.**  
*Análisis proximal de lodo cartonero.*

Parámetro	Unidad	Lodo cartonero
Humedad	%	67.4
Carbono volátil	%	14.5
Carbono fijo	%	3.8
Cenizas	%	14.2

Nota: Obtenido por Universidad Central de Ecuador, (2024).

Basándose en una muestra inicial de 26.806 mg (anexo I), se estableció un contenido de humedad del 67.4%, lo que señala un elevado porcentaje de agua en su condición natural. Este porcentaje indica que, previo a cualquier proceso de tratamiento térmico, una significativa proporción del material se compone de agua, la cual debe ser removida para optimizar la eficacia del procedimiento.

Con relación al contenido orgánico volátil, se registró un 14.5%, esto aclara a las sustancias que se evaporan o tienen una degradación durante la pirólisis a altas temperaturas, y así se demuestra que este material es aplicable para un método de pirólisis y que sea aprovechada como fuente de energía.

En cambio, el carbono fijo, que abarca el 3.8%, hace referencia a la proporción del material que se mantiene en su estado de residuo sólido tras la liberación de los volátiles. Este indicador tiene como función el determinar el potencial energético del biochar que se deriva.

### **3.2.6. Diseño del proceso de pirólisis.**

#### **Método de torrefacción.**

El proceso de torrefacción consiste en una etapa de pirólisis lenta que se realiza a temperaturas entre 200 y 300 °C en atmósferas de nitrógeno, aire o dióxido de carbono, liberando únicamente volátiles ligeros y agua. Este método seleccionado resalta la reducción de proporciones molares del oxígeno (O), del carbono (C), del hidrógeno (H), con el fin del aumento de su poder calorífico obtenido del procesamiento de la biomasa (Mpungu et al., 2024).

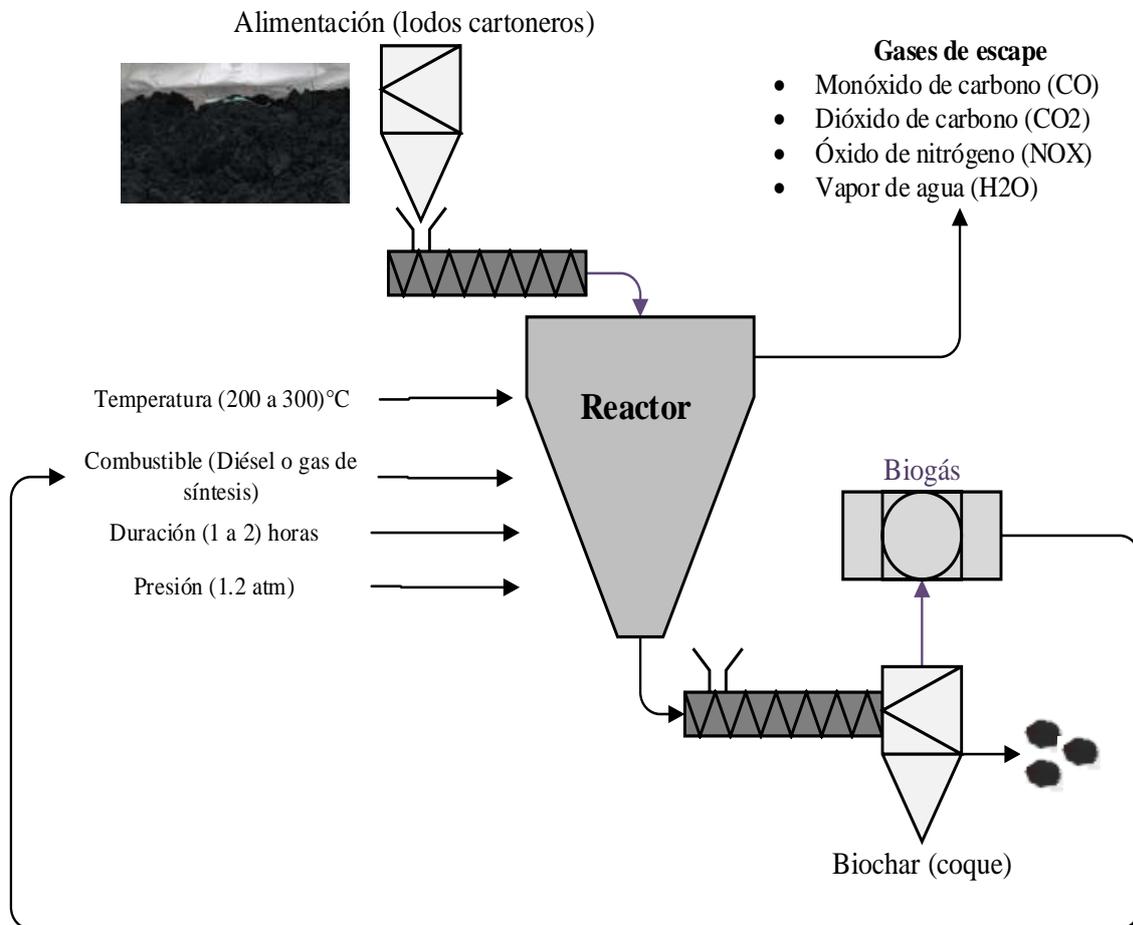
Como un recurso importante en la producción de combustibles, se tiene a la biomasa de alto contenido de lignocelulosa que tiene como beneficios a la emisión neutral del carbono, a una alta disponibilidad y de estabilidad, así permitiendo un manejo seguro. Sin embargo, en

su estado original, esta biomasa presenta ciertas limitaciones, entre ellas, un alto porcentaje de humedad, un contenido elevado de oxígeno, y una estructura química compleja y variable. Estos factores pueden influir en su eficiencia como fuente de energía y en la consistencia del producto final, lo que hace necesario un tratamiento específico para optimizar su rendimiento en aplicaciones energéticas (Chen et al., 2023).

Como los lodos de cartón y papel tiene un alto nivel de celulosa y lignina, un proceso de torrefacción permite una obtención del carbón de coque o biochar, por lo tanto, se lleva a cabo un método pirolítico al considerar los parámetros estimados como la generación de residuos de la empresa Cartonera Orense, al ser de 4 toneladas al día, a una temperatura de 250 a 300° C como indica (Khairy et al., 2024), además de una presión de 1.2 atm, su duración de proceso tiene un intervalo de 1 a 2 horas dependiendo de la cantidad de residuos que se alimenta el reactor que son transportados mediante un sistema de tolvas y tornillos para su entrega de producto y para la recepción de biochar, se considera la obtención de biogás a una menor proporción, sin embargo, es necesario su purificación para su utilización como gas de síntesis para el mismo reactor, la combustión genera gases de efecto invernadero como dióxido y monóxido de carbono, óxido de nitrógeno a menor escala y de vapor de agua que necesitan tener un tratamiento para ser expulsados al exterior como se observa en la figura 27.

**Figura 27.**

*Método de pirólisis (torrefacción lenta).*



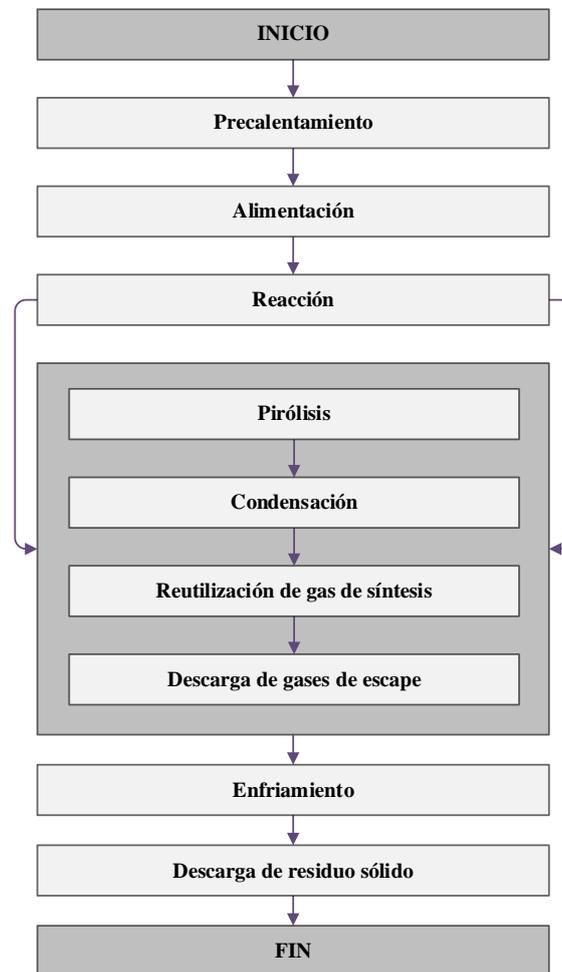
Nota: Elaborado por el autor.

### **Descripción del proceso de trabajo.**

El biochar o carbón de coque sea utilizado como fuente de energía, se inicia con el diseño del proceso pirolítico para el empresa de estudio, como descripción del proceso se divide en las secciones de precalentamiento de reactor, la alimentación con la materia prima, para la reacción se divide en cuatro subgrupos como la pirólisis realizado en el reactor, la condensación utilizada para el gas obtenido de la pirólisis y su reutilización como gas de síntesis, además para el enfriamiento del biochar como producto terminado y de los gases de escape o combustión para su tratamiento para la eliminación de gases como el óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y de trazas de hidrocarburos para la expulsión de gases con baja concentración al exterior como se refleja en la figura 28.

**Figura 28.**

*Proceso de trabajo.*



Nota: Elaborado por el autor en base al (anexo E) por Beston-Group, (2024).

En la figura 28, mediante un diagrama de trabajo se diseña el proceso pirolítico para la empresa Cartonera Orense, mediante una secuencia de actividades mediante máquinas y equipos que se interrelaciona entre ellos, por esto mismo, se describe el proceso de obtención de biochar, el bio – aceite, aunque en el proceso de torrefacción es mínima, es un derivado de la purificación del biogás que alimenta al reactor.

### **Proceso de obtención de biochar (carbón).**

#### **Precalentamiento del reactor.**

El calor necesario para lograr el precalentamiento del reactor, previo a la inyección del lote de material a trabajar, es generado por quemadores que utilizan diésel como combustible inicial. Los gases combustibles son producidos durante la etapa pirolítica, procedimientos

previamente descritos y, en esta fase, los gases que tienen lugar son redirigidos hacia los quemadores, disminuyendo la inyección de diésel paulatinamente y aumentando la eficiencia energética del proceso.

A partir de los parámetros básicos para la utilización del reactor, los materiales de calentamiento recomendados por el fabricante Beston, (2024) señala el uso de combustibles como combustóleo que es donde se incluye el aceite del proceso de pirólisis, el gas natural, el gas licuado de petróleo y el diésel como se observa en la tabla 35.

**Tabla 35.**  
*Poder calorífico de combustibles.*

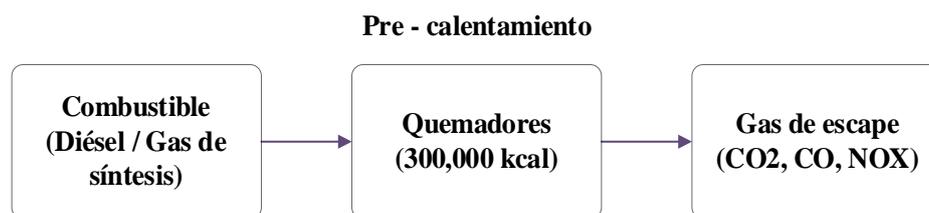
Material de calentamiento	Poder calorífico (MJ/kg)
Combustóleo	40.2
Gas natural	54
GLP	49.5
Diésel	45

Nota: Obtenido mediante Ministerio de Energía y Minas, (2022).

El combustible introducido se utiliza para la alimentación de los quemadores, a 300,000 kilo – calorías para alcanzar la temperatura necesaria para el funcionamiento reactor, en este proceso se expulsan los gases de la combustión como (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>) como se observa en la figura 29.

**Figura 29.**

*Diagrama de entrada y salida (precalentamiento).*

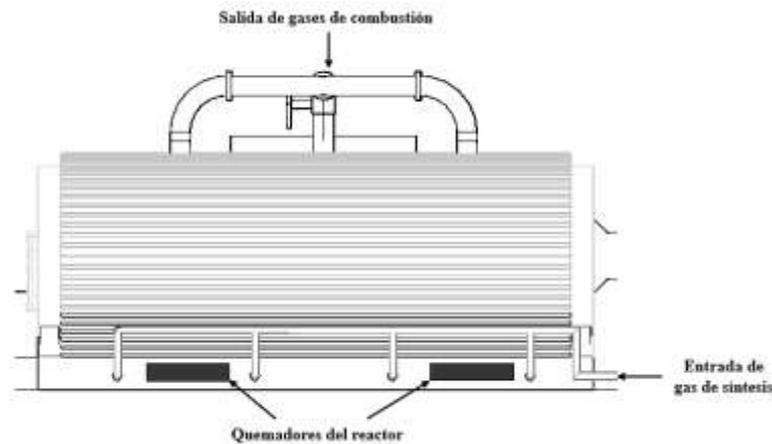


Nota: Elaborado por el autor.

Se realiza una gráfica representativa del diseño de los quemadores en el reactor, en la parte inferior los quemadores existentes de color rojo, además de los tubos de entrada del gas utilizado para el calentamiento y en la parte superior de la máquina las tuberías encargadas de transportar los gases o humos obtenidos de la quema de combustible para su respectivo tratamiento como se observa en la figura 30.

**Figura 30.**

*Diagrama de calentamiento de reactor.*



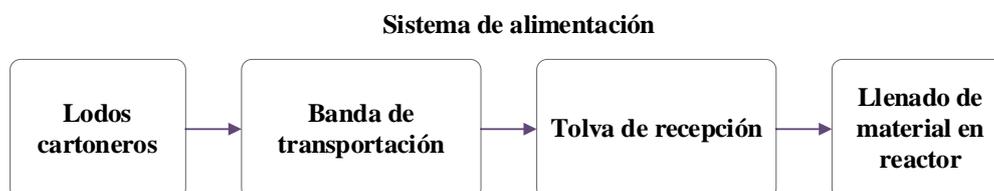
Nota: Elaborado por el autor.

### **Alimentación del reactor.**

El sistema de abastecimiento cuenta con una banda transportadora que tiene como objetivo el transporte de las cargas de cartón desde una tolva hasta el interior del reactor, esto permite el aseguramiento de un flujo que sea constante y controlado para el material, además, con el manejo de 4 a 6 toneladas de desechos generados diariamente. Como se muestra en la figura 31, se proporciona un suministro constante de combustible al reactor para mantener condiciones estables y de evitar fluctuaciones en la temperatura y presión del sistema.

**Figura 31.**

*Diagrama de entrada y salida (sistema de alimentación).*

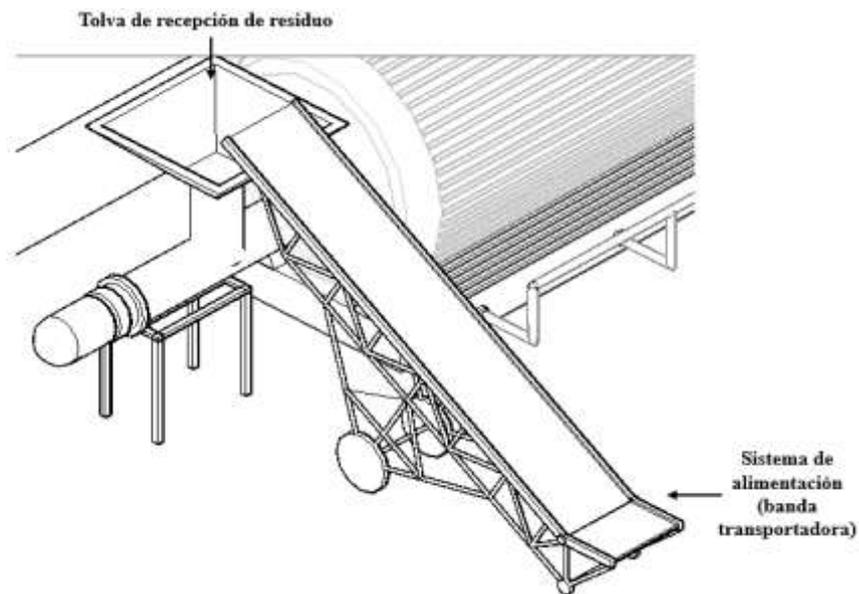


Nota: Elaborado por el autor.

Para el proceso de alimentación del reactor con la materia prima que son lodos cartoneros (anexo G), se elige método de alimentación el uso de banda de transportación especializada para la movilización del material, son dirigidos a la tolva que permite el ingreso del producto mediante un transporte de tornillos en su interior para el inicio del proceso de pirólisis como se visualiza en la figura 32.

**Figura 32.**

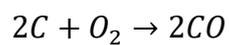
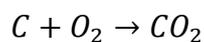
*Diagrama de alimentación de reactor.*



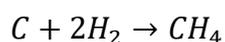
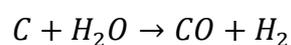
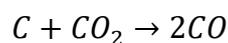
Nota: Elaborado por el autor.

### **Reacción de pirólisis.**

La reacción de pirólisis comienza cuando el reactor llega a cerca de 180 °C. A medida que el proceso progresa, la temperatura se eleva hasta un rango ideal de 250 °C a 300 °C, conservando una presión estable de 1.2 atmósferas. Estas circunstancias son propicias para conseguir una transformación eficaz de los lodos en biochar y otros derivados gaseosos. En esta etapa de descomposición térmica, la materia prima se divide en elementos sólidos y gaseosos, consiguiendo una generación balanceada de material sólido y gas. Dentro de los gases generados, se encuentran los generados a través de reacciones exotérmicas, tales como CO<sub>2</sub> y CO de la manera siguiente:



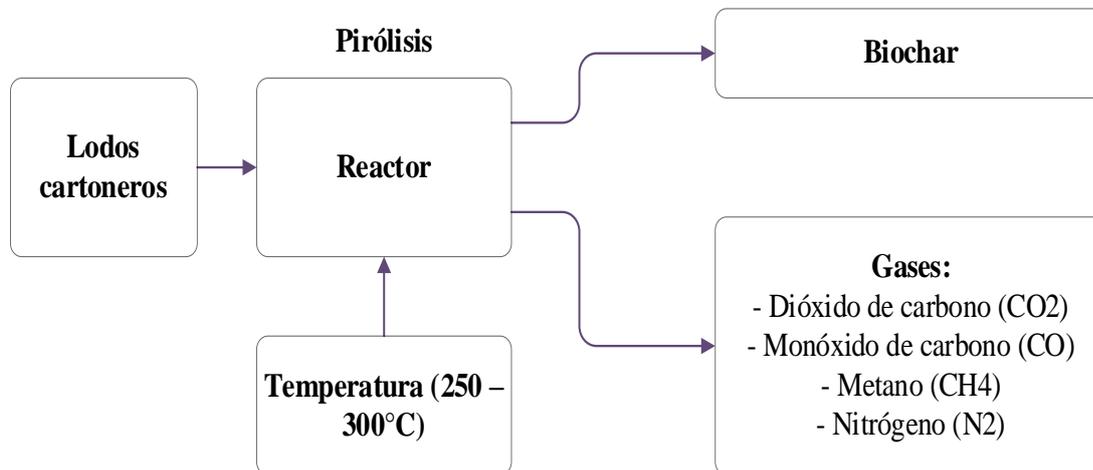
Y de gases derivados de reacciones endotérmicas, como el CH<sub>4</sub>. Además, es posible obtener nitrógeno (N<sub>2</sub>) de la siguiente manera:



Estos gases tienen una alta contribución para la utilización del gas de síntesis como se observa en la figura 33.

**Figura 33.**

*Diagrama de entrada y salida (proceso de pirólisis).*

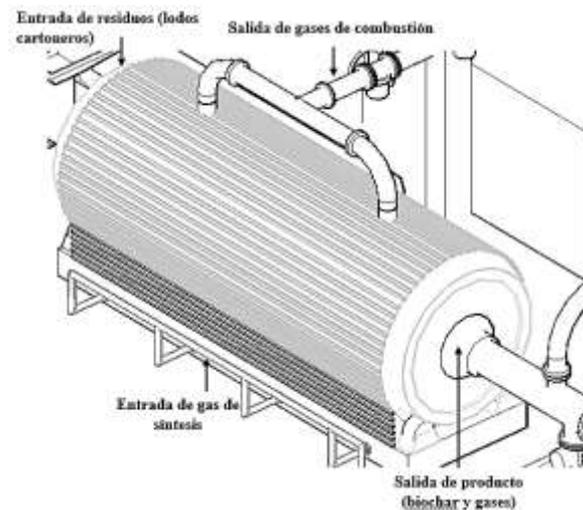


Nota: Elaborado por el autor.

La estructura del reactor está concebida para acoger los desechos de cartón y papel que se han convertido en lodos. En un principio, el sistema utiliza diésel como combustible para producir el calor requerido. Tras alcanzar condiciones estables en el proceso pirolítico, el gas de síntesis generado en el reactor sustituye al diésel en los quemadores, mejorando el proceso a través de la utilización de un recurso energético proveniente del mismo proceso, en vez de combustibles fósiles. Durante los procesos de pirólisis en el reactor, se producen dos productos principales que es: el biocarbón y los gases. Con el biochar se refiere al residuo sólidos provenientes de la materia prima, por otro lado, los gases derivados son canalizados mediante tuberías, lo que facilita su posible tratamiento o disposición adicional. La figura 34 muestra cómo el sistema de tuberías conduce estos gases de combustión.

**Figura 34.**

*Diagrama de reactor de pirólisis.*



Nota: Elaborado por el autor.

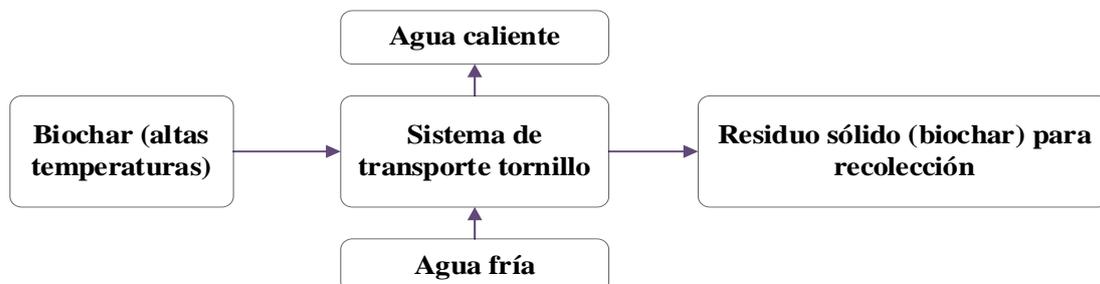
Este diseño de circulación de productos gaseosos permite también un control de emisiones, optimizando la sostenibilidad del proceso al reducir el consumo de combustibles no renovables y minimizar la generación de residuos en un entorno de proceso controlado.

### **Descarga y enfriamiento del biochar.**

Tras finalizar la reacción, el biochar, que todavía mantiene una temperatura de 400 °C a 450 °C, se extrae del reactor a través de un transportador de tornillo. Este transportador incorpora un sistema de refrigeración incorporado, que disminuye la temperatura del biochar a niveles seguros previo a su recolección, previniendo peligros de oxidación o combustión natural al contacto con el aire, tal como se muestra en la figura 35.

**Figura 35.**

*Diagrama de entrada y salida (transporte de biochar).*



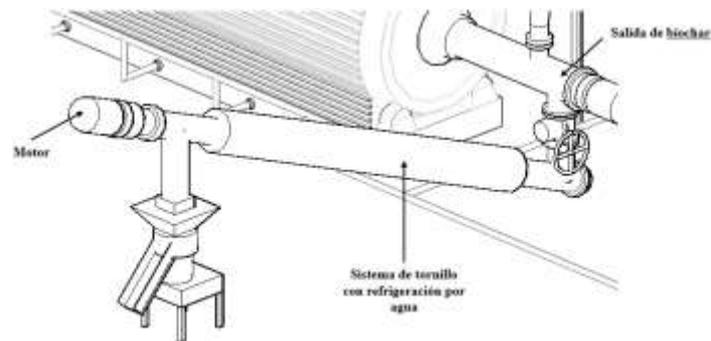
Nota: Elaborado por el autor.

Para la transferencia del producto sólido a alta temperatura, se emplea un sistema de tornillo con una capa que facilita el ingreso de agua a temperaturas y su expulsión para su

regreso al sistema de refrigeración. Con el biochar ya a una temperatura adecuada para su manipulación, se envía al sistema de pellets, tal como se muestra en la figura 36.

**Figura 36.**

*Sistema de transporte de biochar con enfriamiento.*



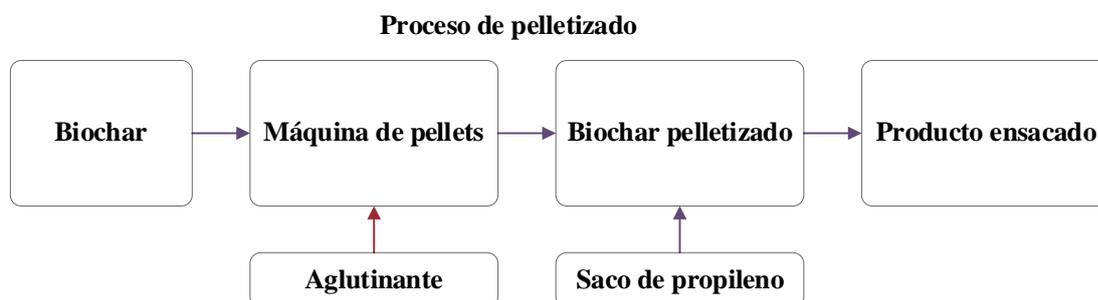
Nota: Elaborado por el autor.

### **Peletizado de biochar.**

El biochar refrigerado se somete a un proceso de peletización donde se añade un aglutinante para conseguir una estructura compacta y uniforme. La longitud de los pellets producidos se corresponde con un estándar cercano de 12 mm, lo que facilita su manejo, almacenaje y potencial uso como fuente de energía sólida o en aplicaciones de mejora de suelos. El proceso de peletización también ayuda a incrementar la densidad y uniformidad del producto final, mejorando su valor añadido, como se explica en la figura 37.

**Figura 37.**

*Diagrama de entrada y salida (peletizado de biochar).*



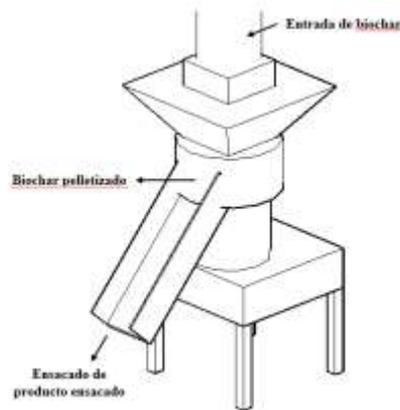
Nota: Elaborado por el autor.

Se sugiere un procedimiento de peletizado que facilita la conversión del carbón extraído del proceso de pirólisis a una forma compacta y homogénea. El ingreso del material se inicia por la parte superior para su transformación en pellets. Una vez que el producto esté preparado,

se guarda en un recipiente de propileno para su traslado al área de almacenamiento, tal como se muestra en la figura 38.

### **Figura 38.**

*Sistema de peletizado de biochar.*



Nota: Elaborado por el autor.

#### **Almacenamiento del biochar peletizado.**

El biochar peletizado se coloca en sacos que lo protegen de la exposición a la humedad ambiental, preservando su calidad y evitando la degradación de sus propiedades fisicoquímicas. Finalmente, estos son trasladado a una zona de almacenamiento destinada específicamente para mantener el producto en condiciones estables para su posterior uso como fuente de energía.

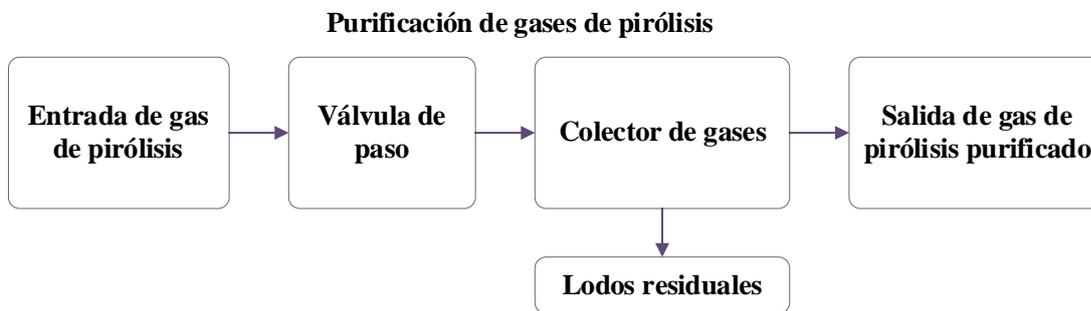
#### **Proceso de obtención de bio – aceite.**

##### **Colector de gases.**

Después de la reacción de pirólisis en el reactor, los gases producidos son transportados a un colector especializado que lleva a cabo la primera fase de descomposición de impurezas. Este dispositivo facilita la división de partículas residuales, previniendo que lodos o componentes no gaseosos se combinen con los gases. En el colector, también se lleva a cabo la distinción inicial entre gases pesados y ligeros, aspecto crucial para mejorar la eficiencia en las fases subsiguientes de condensación y extracción de bio-aceite, tal como se explica en la figura 39.

**Figura 39.**

*Diagrama de entrada y salida (colector de gases)*

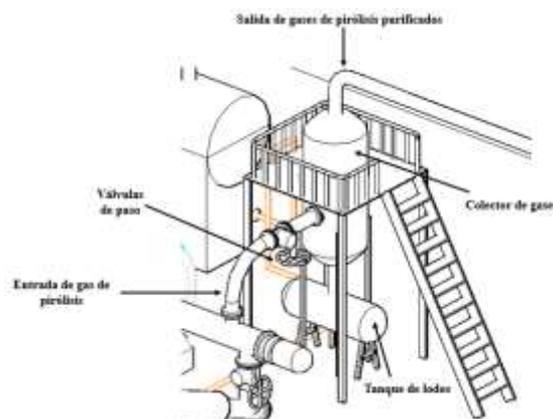


Nota: Elaborado por el autor.

Al finalizar el proceso de pirólisis en el reactor, se transportan los gases obtenidos a una máquina para su purificación, al separar lodos residuales mezclados en el gas y almacenados en un tanque exterior, mientras que el producto deseado es dirigido por tuberías al sistema de condensación, como se observa en la figura 40.

**Figura 40.**

*Proceso de colección de gases.*



Nota: Elaborado por el autor.

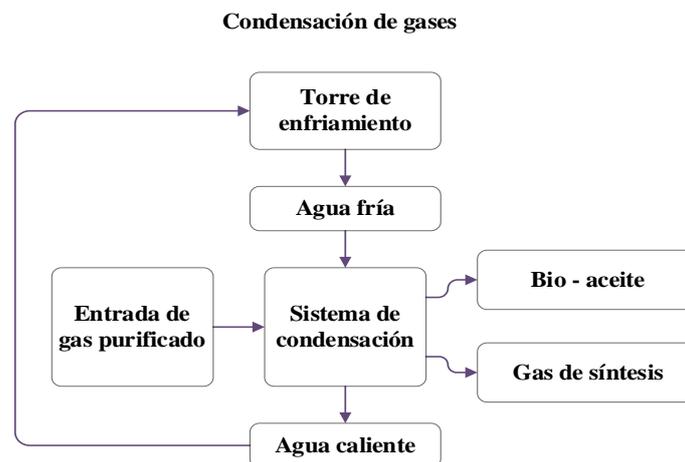
### **Sistema de condensación.**

Se inicia su proceso de purificación dentro del colector, en donde los gases obtenidos son transportados a un sistema de condensación que es creado para el enfriamiento de los gases de alta densidad y que pasen a su estado líquido. Durante esta etapa, se consigue condensar los gases de mayor peso que se convierten en aceite pirolítico, por otro lado, los gases de menor densidad se mantienen en su estado gaseoso, esto es debido a propiedades de volatilidad. El

sistema de condensación incorpora una torre de refrigeración que utiliza un circuito de agua en recirculación, lo que facilita la conservación eficaz de la temperatura, garantizando un proceso sustentable y de menor impacto en el medio ambiente, tal como se muestra en la figura 41.

**Figura 41.**

*Diagrama de entrada y salida (condensación y enfriamiento).*

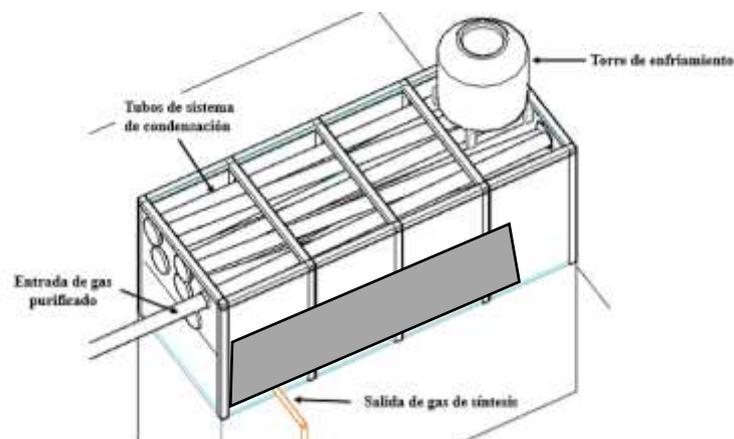


Nota: Elaborado por el autor.

El aceite se almacena en la parte inferior del sistema de condensación (debido al método que produce una muy pequeña porción de bio – aceite), mediante un proceso de refinación se obtiene el biodiésel de un alto valor añadido y que sea utilizado como combustible, además la torre de enfriamiento está conectada a los demás equipos de condensación en el proceso pirolítico como se observa en la figura 42.

**Figura 42.**

*Diagrama de sistema de condensación y enfriamiento.*



Nota: Elaborado por el autor.

Con relación a la tabla 36, son categorizados los gases y el líquido derivado del proceso de pirolítico al pasar por el sistema de condensación, en donde se separan para su purificación. En la fase líquida, tiene un alto contenido de agua ( $H_2O$ ), fenoles, hidrocarburos pesados, alquitranes y de compuestos de gran peso molecular que son producto de la descomposición térmica de la biomasa. Respecto a los gases obtenidos, tanto los componentes que son livianos a como los que tienen una mayor complejidad se incluyen. Donde el monóxido y el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) son los de mayor generación este es mediante las distintas reacciones de oxidación parcial y combustión incompleta.

**Tabla 36.**  
*Productos obtenidos de condensación.*

Líquidos obtenidos	Gases obtenidos
Agua ( $H_2O$ )	Monóxido de carbono ( $CO$ )
Fenoles	Dióxido de carbono ( $CO_2$ )
Hidrocarburos pesados ( $C_nH_m$ )	Metano ( $CH_4$ )
Alquitranes	Etano ( $C_2H_6$ )
	Etileno ( $C_2H_4$ )

Nota: Elaborado por el autor en base Redondo-Gómez et al., (2020).

La presencia de estos compuestos, tanto líquidos como gaseosos, refleja la variedad de productos obtenibles mediante la pirólisis, cada uno con propiedades específicas que permiten su potencial aprovechamiento en aplicaciones energéticas y químicas industriales.

#### **Almacenamiento del bio – aceite.**

El resultado del aceite pirolítico se dirige al depósito interno de almacenamiento del sistema de condensación, que es específico para su conservación y uso futuro. Este depósito está concebido para preservar la integridad del bio-aceite, resguardándolo de la oxidación y previniendo cualquier potencial volatilización o disminución de su calidad. Este almacenamiento regulado facilita una gestión segura del aceite pirolítico, posibilitando su utilización como combustible alternativa o insumo en otros procesos industriales.

#### **Proceso de obtención de gas.**

##### **Purificación en sistema de condensación y sello de agua.**

Con la producción del bio - aceite, de los gases ligeros en su estado gaseoso obtenidos del sistema de condensación, estos son transbordos al sistema de purificación mediante una

sección de sellado de agua, esto desempeña un papel importante, ya que implica en la eliminación de las impurezas del gas que no son deseables, y así conseguir un producto limpio para su consumo como energía. Esta fase previene contaminantes en la combustión, incrementando su eficiencia energética y disminuyendo emisiones perjudiciales, mientras se asegura que el gas de síntesis satisfaga los criterios requeridos para su utilización, como se muestra en la tabla 36.

**Tabla 37.**

*Gases purificados y eliminados de sello de agua.*

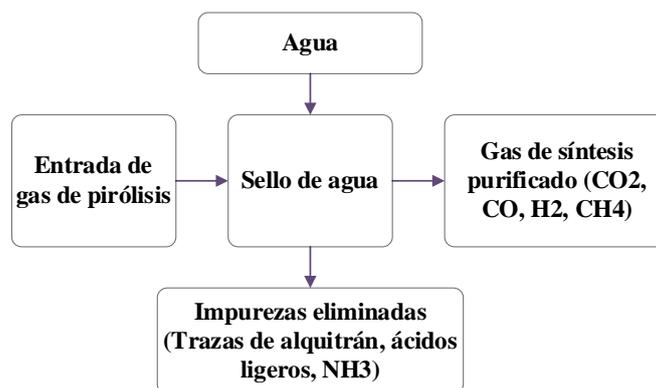
Gas de síntesis purificado	Impurezas eliminadas
Monóxido de carbono ( $CO$ )	Trazas de alquitranes
Dióxido de carbono ( $CO_2$ )	Amoniaco ( $NH_3$ )
Metano ( $CH_4$ )	Trazas de ácidos ligeros
Hidrógeno ( $H_2$ )	

Nota: Elaborado por el autor.

Como resultado es un gas de síntesis más limpio y adecuado para su uso como combustible en quemadores o en otros procesos energéticos industriales, al eliminar las impurezas del gas como se grafica su proceso en la figura 43.

**Figura 43.**

*Diagrama de entrada y salida (sello de agua).*

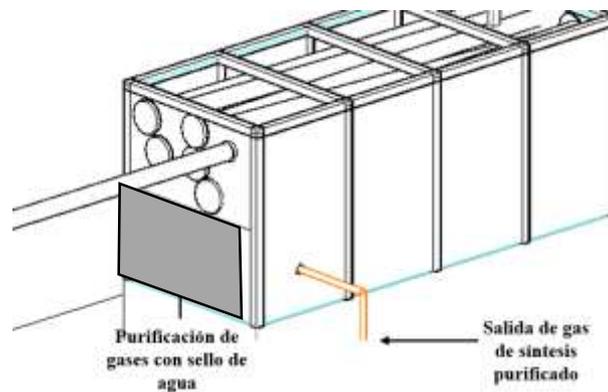


Nota: Elaborado por el autor.

Este proceso de purificación por un sello de agua es realiza en la parte inferior del sistema de condensado donde el agua es transportada a un cámara donde se separan los compuestos innecesarios, el gas purificado se moviliza por tuberías a las máquinas donde se utiliza como combustible, tal como se visualiza en la figura 44.

**Figura 44.**

*Diagrama de sistema de purificación.*

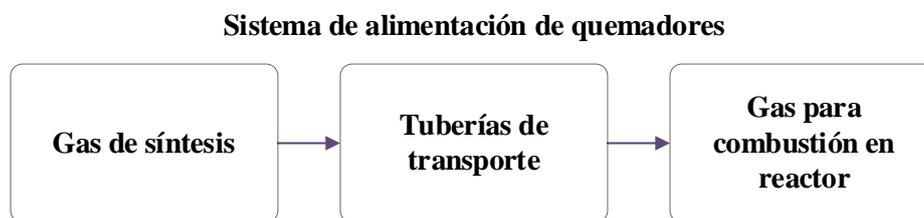


Nota: Elaborado por el autor.

### **Utilización del gas de síntesis en el sistema de combustión del reactor.**

Con el gas purificado, este es dirigido mediante el sistema de tuberías como final al sistema de combustión del reactor, en donde es utilización para la alimentación de los quemadores, es decir, se transforma en energía y de sustituto de diésel que es utilizado en la fase inicial, otorgando que el proceso autogenera su propia energía de combustión, adicionalmente, se reduce el consumo de combustibles comerciales, reducción de costo de operación y de la huella de carbono. La utilización constante del gas de síntesis en el reactor garantiza la estabilidad de la temperatura y la presión durante toda la reacción de pirólisis, tal como se muestra en la figura 45.

**Figura 45.** *Diagrama de entrada y salida (combustión con gas de síntesis).*

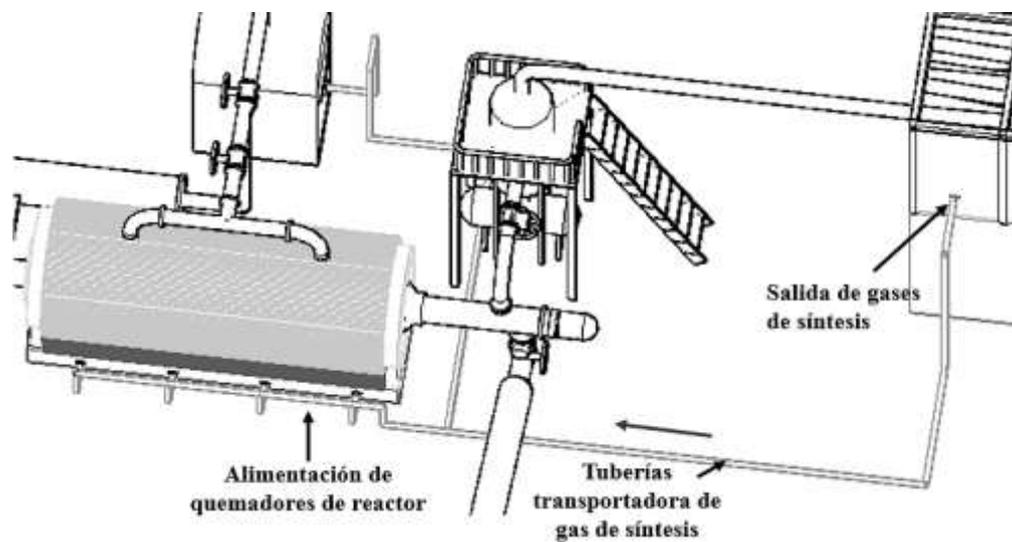


Nota: Elaborado por el autor.

El sistema de tuberías donde se traslada el gas de síntesis se conecta al sistema de condensación y se dirige a los quemadores del reactor, que permite la proporción de energía para la reacción con un poder calorífico entre 12.55 MJ/kg y de 17.15 MJ/kg dependiendo de los porcentajes de los gases que contiene según Rabah, (2023) como se observa en la figura 46.

**Figura 46.**

*Transporte de gas de síntesis para quemadores.*

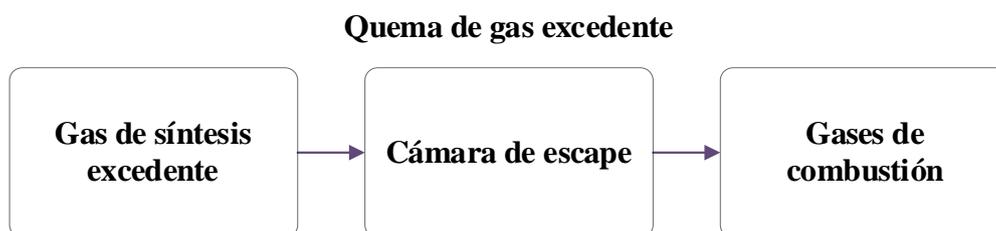


Nota: Elaborado por el autor.

### **Cámara de escape para gases excedentes.**

Es necesario la construcción de un sistema de quema de gases, en situaciones de exceso del producto que no es beneficiado por los quemadores, por lo tanto, su quema es necesario para evitar que se expulse con un gas peligroso a la atmósfera, entonces, su regulación es un punto importante para evitar riesgos y conseguir un proceso seguro, tal como se muestra en la figura 47.

**Figura 47.** *Diagrama de entrada y salida (quema de gas excedente).*

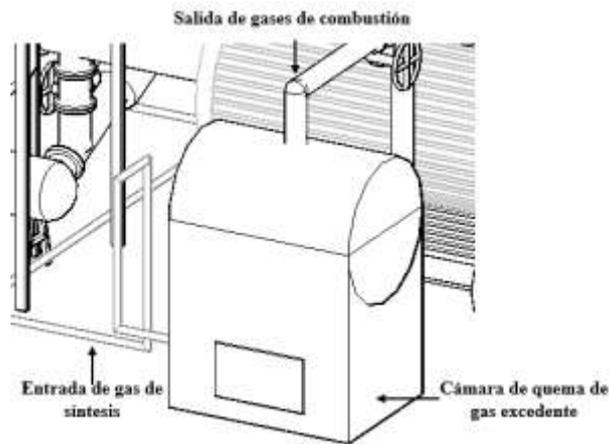


Nota: Elaborado por el autor.

El gas de síntesis cuando excede en la alimentación del reactor, es necesario su expulsión mediante su quema, por lo tanto, se instala una cámara que reciba estos gases, sin embargo, este proceso genera gases de combustión, por lo tanto, es necesario su extracción para su tratamiento evita la liberación al exterior, provocando emisiones de carbono como se observa en la figura 48.

**Figura 48.**

*Proceso de quema de gas de síntesis.*



Nota: Elaborado por el autor.

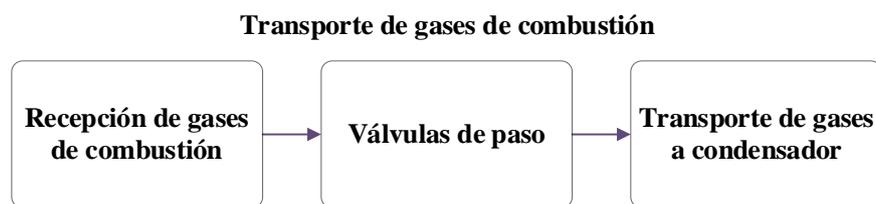
- *Proceso de tratamiento de gases de escape.*

**Transporte de gases de escape.**

Los humos producidos durante el proceso de combustión en el reactor, junto con los generados en la cámara de escape para el gas sobrante, son canalizados mediante un sistema de tuberías creado específicamente para el tratamiento seguro de gases de alta temperatura y potenciales contaminantes, tal como se especifica en la Figura 49.

**Figura 49.**

*Diagrama de entrada y salida (transporte de gases).*

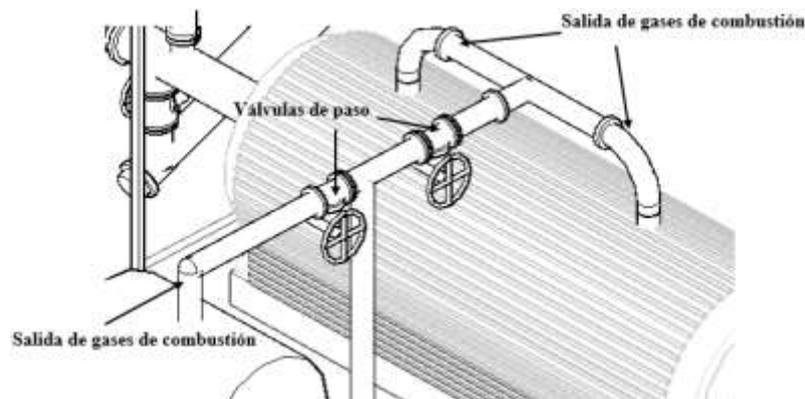


Nota: Elaborado por el autor.

Cuando tanto el reactor o la cámara de quema son utilizados, se abren la válvula respectiva, para su traslado al sistema de tratamiento de gases de escape, esto permite que se eliminen elementos nocivos como se observa en la figura 50.

**Figura 50.**

*Recepción de gases de combustión.*



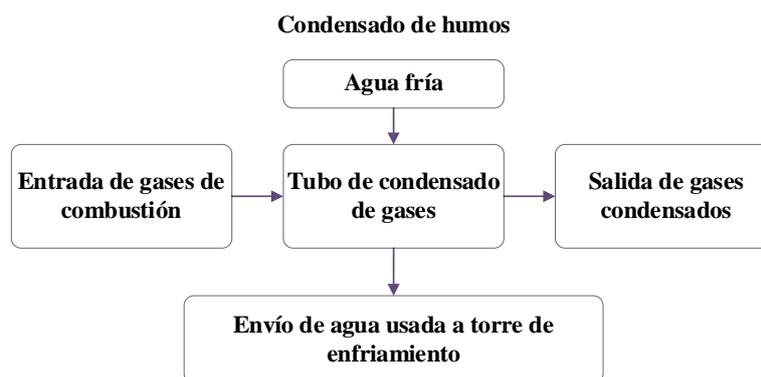
Nota: Elaborado por el autor.

### **Condensador de humos.**

Después de ser trasladados, los gases de escape son introducidos en el condensador de humos, un dispositivo crucial para disminuir la contaminación. La función de este condensador es el enfriamiento de los gases expulsado por el proceso de calentamiento del reactor y de la cámara de quema, y así mantener las partículas y de sustancias volátiles que son altamente dañinas para el medio ambiente de la zona, como indica la figura 51.

**Figura 51.**

*Diagrama de entrada y salida (condensación de gases de escape).*

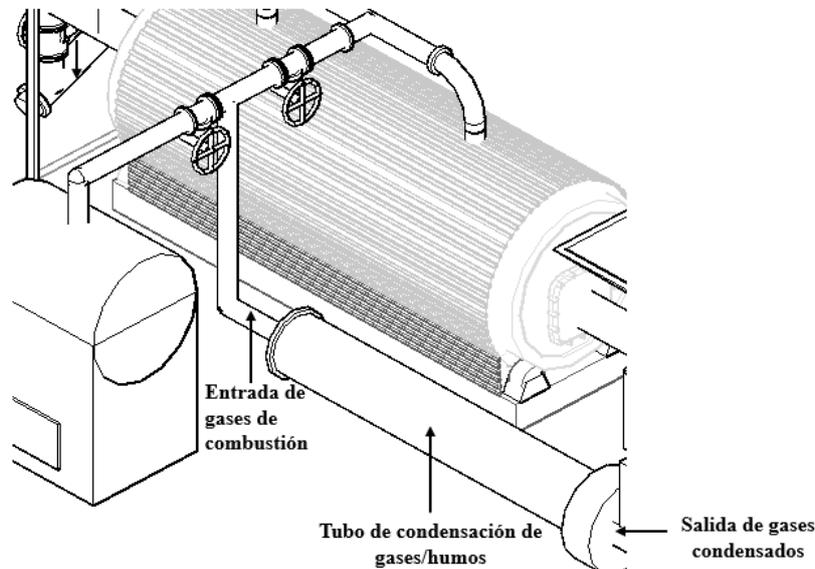


Nota: Elaborado por el autor.

Para el proceso de condensación, se utiliza, un tubo para su transporte, además el agua es obtenida de la torre de enfriamiento que al ser utilizada es nuevamente enviada de vuelta para su reutilización como agua de baja temperatura, los gases de escape condensados son enviados al sistema de tratamiento como se observa en la figura 52.

**Figura 52.**

*Diagrama de tubo de condensación de gases.*



Nota: Elaborado por el autor.

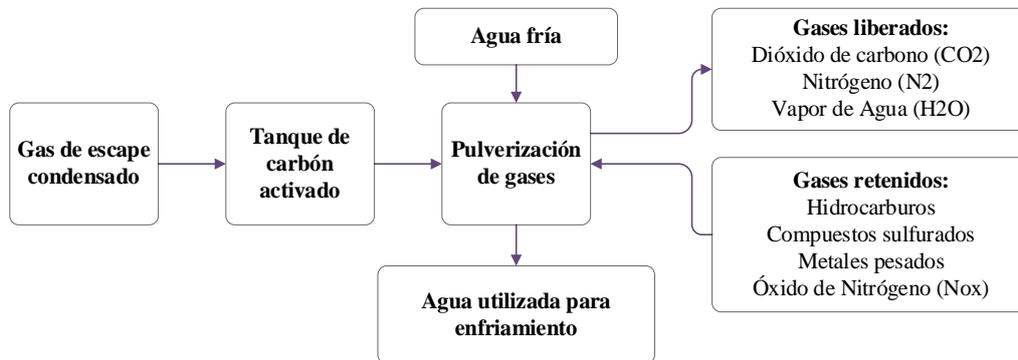
- ***Torre de pulverización.***

Dentro de esta etapa, se introducen los gases que son generados por la combustión, que está sujeto a un tipo de tratamiento para que retengan a partir de gotas de agua, los gases nocivos para el medio ambiente, este se desarrolla dentro de la torre, porque es necesario que se absorban estos gases y que se expulsan contaminantes neutralizados, o, mejor dicho, que se evita una extensa emisión de partículas que llegan a que la calidad de aire se obtenga una mejor calidad.

Los gases de escape, tales como óxidos de carbono como el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), se presentan como residuos de hidrocarburos volátiles residuales, óxidos de nitrógenos (NO<sub>x</sub>) generados a altas temperaturas u óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), metales pesados en forma de partículas, y posibles compuestos sulfurados.

**Figura 53.**

*Sistema de tratamiento de gases de escape.*

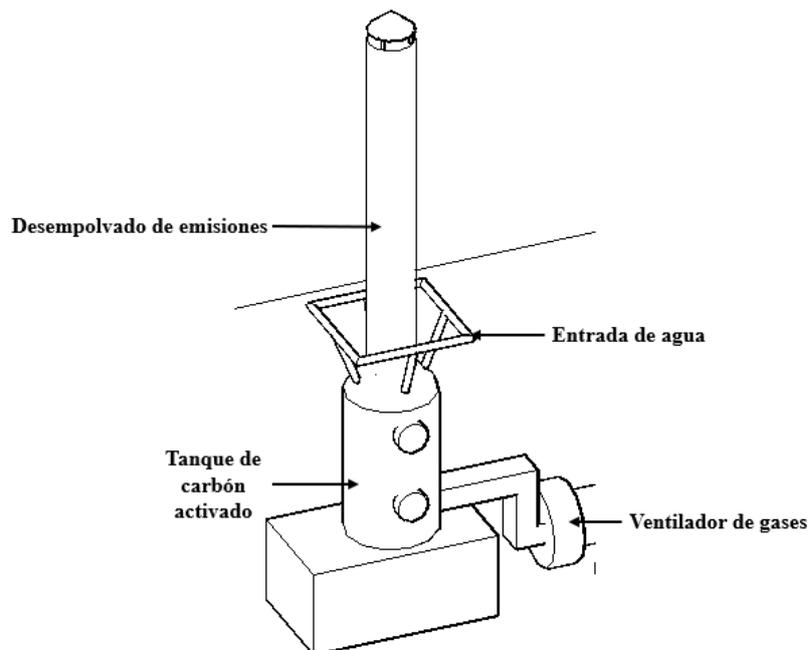


Nota: Elaborado por el autor.

En la figura 53, el sistema de tratamiento de gases de escape que provienen del tubo de condensado atraviesa un tanque de carbón activado. Además, durante la pulverización de gases se suministra agua para el enfriamiento y la eliminación de los polvos. Entre los gases retenidos se encuentran los hidrocarburos, los compuestos sulfurados, los metales pesados y el óxido de nitrógeno. Además, se liberan al exterior el dióxido de carbono de baja concentración.

**Figura 54.**

*Sistema de tratamiento de gases de escape.*



Nota: Elaborado por el autor.

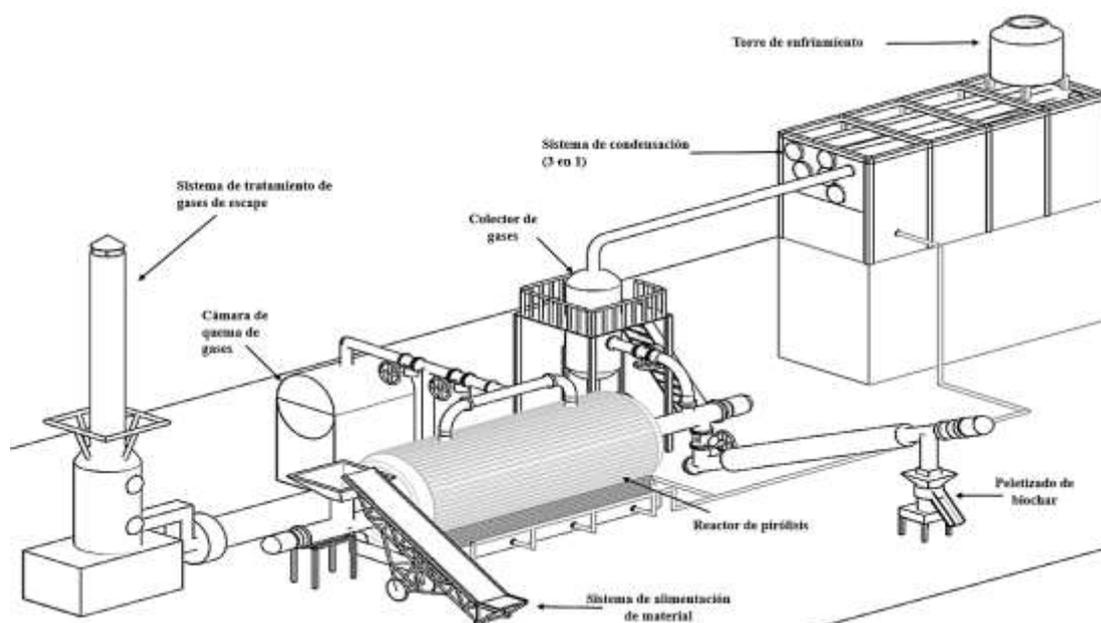
En el sistema de pulverización de la figura 54, mediante un ventilador para gases, ingresan los gases emitidos en el proceso de combustión, con un tanque de carbón activado para el desempolvado de emisiones, en la torre se utiliza agua para el sistema de enfriamiento, los gases son expulsados a una menor concentración al final de la torre.

### **Diseño pirolítico para residuos de cartón y lodo.**

La disposición del proceso pirolítico propuesto se propone con una estructura que comience con el sistema de alimentación con los desechos específicos que son los lodos de cartón y papel. Este se vincula con el reactor de pirólisis en un lado, mientras que en el otro extremo se conecte un sistema de tuberías con sistemas de condensación y tornillos de transporte para transportar el biochar hacia la peletizadora, mientras que los gases recolectados sean purificados y condensados para la obtención, por otro lado, los gases de la combustión son enviados al sistema de tratamiento de gases a partir de desempolvados para la reducción de gases de efecto invernadero, como último, son enviados al exterior como se observa en la figura 55.

**Figura 55.**

*Diseño de proceso pirolítico para residuos de cartón.*



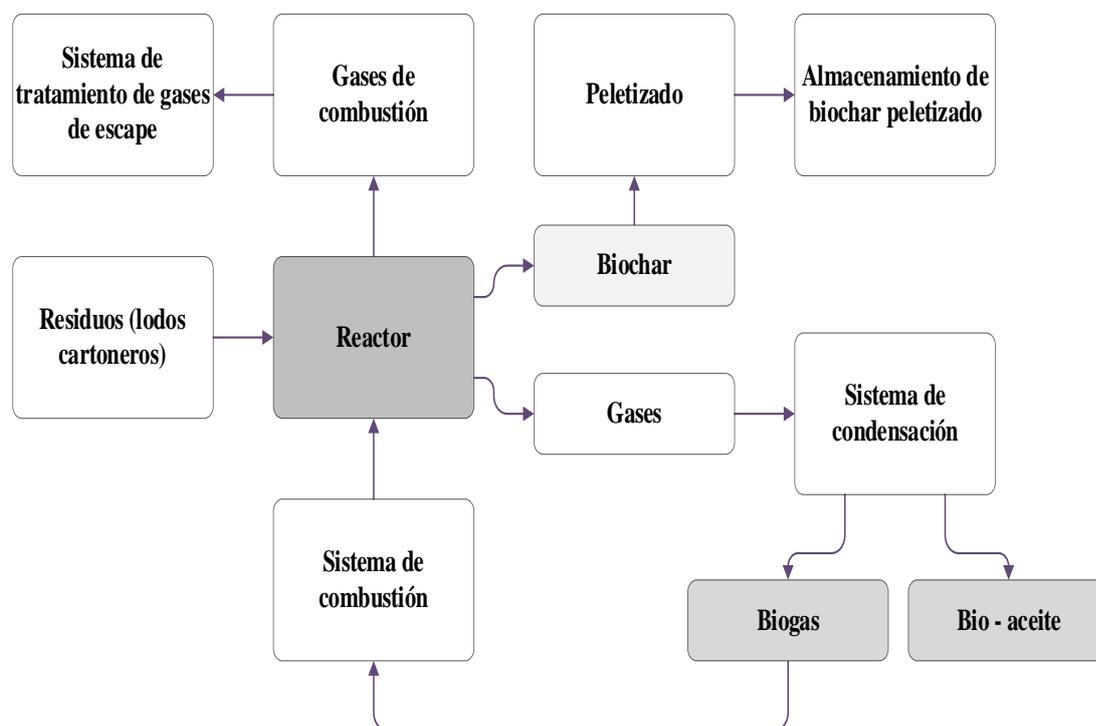
Nota: Elaborado por el autor.

En el método de torrefacción propuesta en el trabajo de investigación, es iniciado con la introducción de la materia prima (lodo cartonero) al reactor para la obtención de biocarbón,

que es sometido a un sistema de peletizado para un mejor almacenamiento en sacos para ser utilizados por la misma empresa cartonera. Mientras que, los gases de proceso pirolítico son dirigidos al sistema de condensación, donde se obtiene el biogás y un porcentaje bajo de bio – aceite debido al método propuesto que se almacena en una sección del sistema de condensado. Mientras tanto, el biogás es canalizado hacia el sistema de combustión del reactor para mantener el proceso energético (anexo H). Finalmente, el sistema de desempolvado trata los gases de escape derivados de la combustión del biogás, el cual captura partículas residuales y asegura una emisión controlada al exterior, minimizando el impacto ambiental como se observa en la figura 56.

**Figura 56.**

*Diagrama de proceso pirolítico para lodos cartoneros.*



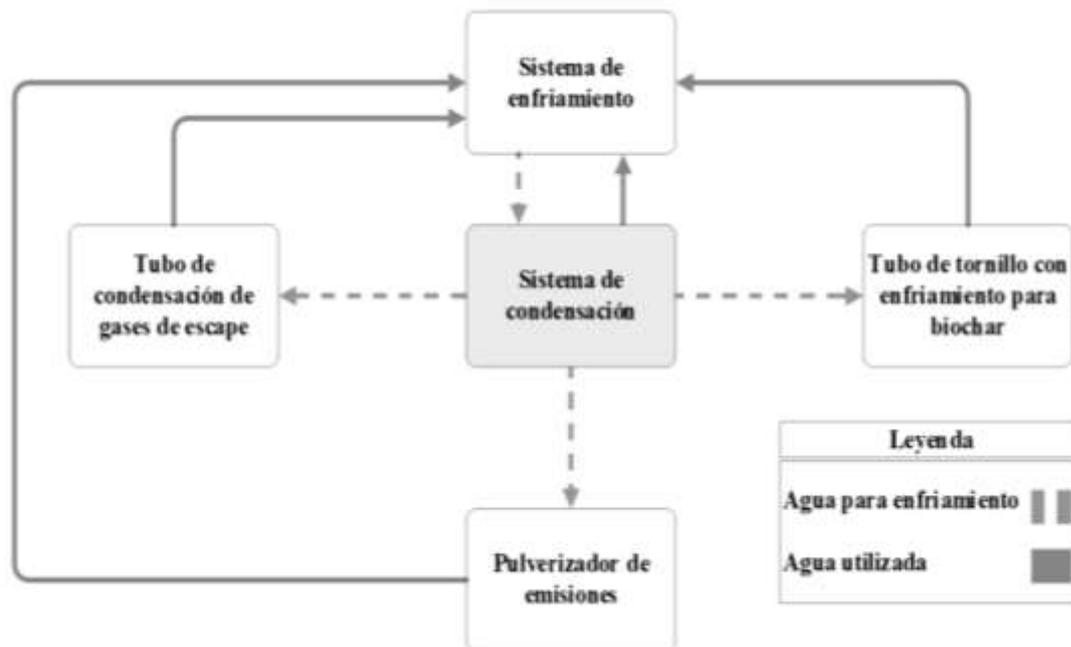
Nota: Elaborado por el autor.

En esta sección, se detalla el sistema de enfriamiento del proceso de pirólisis mediante un método de torrefacción para lodos cartoneros, esto tiene como objetivo el mantener de óptima temperatura al agua utilizada en las distintas etapas del proceso, esto permite la garantía y una mejor seguridad. En primer lugar, el agua regula la temperatura en el tubo de condensación, que regula los gases de escape producidos durante la combustión y calienta el reactor, y en la cámara de combustión del exceso de gas. Además, los métodos de tratamiento

de gases de efecto invernadero utilizan torres de aspersion para reducir las emisiones y enfriarlas antes de su liberación. Finalmente, el agua se introduce en la tubería de enfriamiento de biocarbón para reducir su temperatura a un nivel seguro para su posterior manipulación y almacenamiento eficiente.

**Figura 57.**

*Sistema de enfriamiento y recepción de agua utilizada.*



Nota: Elaborado por el autor.

Además, para la reutilización de agua, se establece un sistema de regreso a la torre de enfriamiento a través de tuberías (color verde), con el fin de reducir los niveles de agua necesarios.

A partir de este diseño completo del proceso pirolítico mediante un método de torrefacción para la obtención de una mayor proporción de carbón de coque o biochar, además es necesario la aplicación de pruebas a este residuo como evidencia a la composición del producto final de la propuesta.

### **3.2.7. Muestra de lodos residuales de cartón y papel.**

#### **Prueba de reducción de residuos.**

En este experimento se realizó una prueba de reducción de residuos aplicada al lodo cartonero, estableciendo un procedimiento en tres fases como se observa en la tabla 38.

**Tabla 38.**  
*Prueba de reducción de residuos de cartón.*

Proceso	Descripción	Evidencia
Recolección de muestra	Se seleccionó una muestra base de 1000 gramos de lodo, obtenida mediante un proceso de recolección cuidadoso y fue sometido a un pesaje para asegurar representatividad.	
Proceso de incineración	A partir de la muestra sometida a una combustión con el uso de gas doméstico con un recipiente adecuado, a un tiempo de 1 hora y 30 minutos para una reducción total	
Obtención de carbón	Como resultado de esta combustión, se obtiene una reducción de la materia prima de un total de 200 gramos de carbón, esto representa una disminución del 80% de la masa inicial del residuo.	

Nota: Elaborado por el autor.

Se resalta, que en este proceso también se identificó una pérdida del 2% asociada a la manipulación y extracción del carbón generado, cifra que refleja las condiciones reales del experimento y subraya la eficacia de este método en la reducción volumétrica del residuo, además de aportar un subproducto con potencial de reutilización (anexo I).

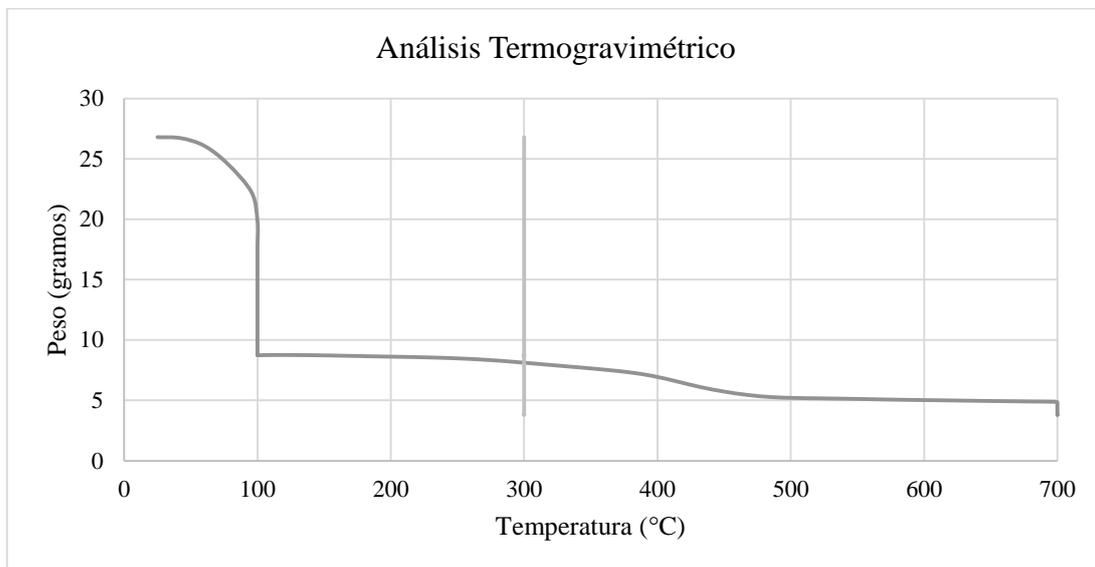
#### **Análisis termogravimétrico.**

Se realiza un análisis termogravimétrico (TGA) a lodos de cartón y papel bajo condiciones controladas de temperatura y presión adecuadas para la pirólisis (generalmente entre 250 y 300 °C y a una presión de alrededor de 1.2 atm), los resultados esperados pueden indicar las siguientes etapas de degradación térmica:

- **Pérdida de humedad inicial (150 °C):** en esta primera etapa se evapora la humedad residual del lodo. La pérdida de masa corresponde al agua presente en la muestra, lo que corresponde a un peso inicial de 67,4 µl dependiendo del contenido de agua.
- **Degradación de la hemicelulosa (200 – 600 °C):** durante esta etapa, se comienza a elevar la temperatura con el fin de que la hemicelulosa, al ser el primer compuesto que se degrada a este rango de temperatura por su naturaleza de ser inestable, este tiene una reducción del 14.5% del material residual, o, mejor dicho, los carbonos volátiles como CO y CO<sub>2</sub> son los principales gases por retirar.
- **Descomposición de la celulosa (260 – 350 °C):** se ha evidencia que, la celulosa es la que conforma con un mayor contenido del total de biomasa de cartón y papel, por lo que se logra una reducción entre el 75% a 80% de la materia prima, esto empieza a una temperatura de 260 °C y finaliza cuando se llega a 350 °C, dicho esto, como resultado se empieza a obtener pequeñas proporciones de gases volátiles que al condensarse se obtiene un derivado del proceso que es bio – aceite.
- **Fase de descomposición de lignina:** en esta sección, solo se obtiene la reducción del 7% del material a una temperatura mayor a 260 °C hasta 700 °C que es el rango mayor permitido en el análisis termogravimétrico, esto es provocado debido a que la lignina se considera como un compuesto que es muy resistente. Sin embargo, como el método propuesto es la torrefacción que tiene un límite de 300 °C como temperatura, no se considera reducción considerable de la lignina, por lo que se compensa con la mayor obtención de biocarbón, que el resto de los derivados.
- **Pérdida total de masa:** al finalizar el proceso de torrefacción a 300 °C, la muestra de 26.806 gramos de lodo cartonero, este ha perdido entre el 75% de su masa inicial, dependiendo del contenido de humedad y la composición exacta de la muestra. El residuo, que constituye el biochar, presenta una alta proporción de carbono estable.

**Figura 58.**

*Análisis termogravimétrico de lodos cartonero.*



Nota: Obtenido mediante analizador termogravimétrico.

En la figura 58, el análisis termogravimétrico a 300 °C muestra que la torrefacción es efectiva para concentrar carbono en el biochar, al eliminar compuestos volátiles y parcialmente descomponer las fracciones de celulosa y hemicelulosa, resultando en un material de mayor poder calorífico y menor reactividad en comparación con la materia prima inicial.

### **3.2.8. Análisis de producto (biochar).**

#### **Análisis proximal.**

Un análisis proximal del biochar obtenido a partir de los lodos cartoneros proporciona información sobre su composición en términos de contenido de humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas (Raček et al., 2024). Por lo tanto, se busca la evaluación de las propiedades del material final durante este proceso de torrefacción, para identificar el porcentaje de biochar obtenido como se refleja en la tabla 39.

**Tabla 39.**  
*Análisis proximal.*

<b>Producto</b>	<b>Biochar</b>
Humedad	-
Material volátil	18.4% ± 0.1
Carbono fijo	67.4% ± 0.4
Cenizas	14.2% ± 0.5

Nota: Obtenido por (Raček et al., 2024).

Un estudio del biocarbón generado por el proceso de pirólisis muestra características significativas, destacando su capacidad como recurso bioenergético. Adicionalmente, se evidenció que el porcentaje de sustancias volátiles era del 18,4% ± 0,1 y, al ser calentado, se podía liberar un porcentaje moderado de biocarbón en forma de gas y vapor, lo que añadía energía adicional a la capacidad productiva. La mayor proporción del producto es del contenido de carbono sólido, que se consigue un valor de 67,4% ± 0,4, que representa un elevado porcentaje de carbono sólido, es decir, que se llega a obtener una mejor estabilidad térmica y de un mejor valor de poder calorífico por para del biocarbón que resulta esencial para su aplicación como fuente de energía en la empresa Cartonera Orense.

Por lo tanto, a partir de los resultados obtenidos de los análisis, se puede comprobar que con una reducción del 75% del lodo cartonera, este contiene una alta proporción de carbono fijo que es quien da el mayor aporte de energía, sin embargo se obtiene una parte materiales volátiles y de porcentaje medio de cenizas lo que puede implicar la reducción del poder calorífico al biocarbón, sin embargo, se mantiene que permite su aplicación como fuente de energía para las instalaciones de la industria Cartonera Orense, además de una reducción en el almacenamiento de residuos.

#### **Análisis elemental.**

El estudio elemental del biochar extraído de lodos de cartón ofrece datos acerca de su composición en cuanto a carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N) y azufre (S), lo cual es crucial para valorar su calidad como biocombustible y su efecto en el medio ambiente (Raček et al., 2024). Seguidamente, se expone el estudio de cada componente en este biochar, tal como se muestra en la tabla 40.

**Tabla 40.**  
*Análisis elemental*

Producto	Biochar
Carbono (C)	72.23%
Hidrógeno (H)	1.5%
Nitrógeno (N)	6.53%
Azufre (S)	<0.01%
Oxígeno (Oa)	19.74%

Nota: Obtenido por (Raček et al., 2024).

A partir de investigación en relación con procesos pirolíticos del carbón, se consigue información sobre la composición estimada de su composición química a partir de un proceso de torrefacción, además que se obtiene el potencial energético. Con la cantidad de carbono del 72,23% del bio carbón, se resalta su aplicación como un combustible para su uso como fuente de energía. Mientras, que se obtiene una obtención de hidrógeno de 1,5%, que es beneficioso para el producto final, por el hecho que es un producto altamente reactivo y mantiene su estabilidad. Para el nitrógeno con un porcentaje de 6.53% no tiene un efecto para el producto, pero su detección implica que, en el momento de la combustión, se llega a generar gases como el NOx que es nocivo para la atmósfera, por lo tanto, el sistema de tratamiento de gases debe estar conectado a los procesos a que se pretende utilizar. Como último, el contenido del 19.74% de oxígeno es quien aporta a un intercambio catiónico.

***Fórmula de Dulong.***

$$\text{Poder calorífico} \left[ \frac{MJ}{kg} \right] = 0.338C + 1.428 \left( H + \frac{O}{8} \right) + 0.095 S$$

$$\text{Poder calorífico} \left[ \frac{MJ}{kg} \right] = 0.338(72.23\%) + 1.428 \left( (1.5\%) + \frac{(19.74\%)}{8} \right) + 0.095(0.01)$$

$$\text{Poder calorífico} \left[ \frac{MJ}{kg} \right] = 23.17 \left[ \frac{MJ}{kg} \right]$$

La evaluación del poder calorífico del biochar, determinada a través de la fórmula de Dulong, muestra un valor de 23.17 MJ/kg. Este hallazgo indica que el biochar posee un potencial considerable como fuente de energía, dado que su capacidad calorífica se sitúa en un rango apropiado para combustibles sólidos de uso industrial. Estoy convencido de que el

método pirolítico sugerido facilita la transformación eficaz de los desechos de cartón de la compañía Cartonera Orense en un producto energéticamente eficiente.

**Tabla 41.**  
*Tabla comparativa de combustibles.*

<b>Combustible</b>	<b>Poder Calorífico (MJ/kg)</b>
<b>Biochar (Cartón)</b>	<b>23.17</b>
Carbón Vegetal	15
Carbón Mineral	27
Leña Seca	15
Pellets de Madera	17
Gas Natural (metano)	54
Diesel	45
Gasolina	47
Propano	49.9
Etanol	29.7
Biodiésel	34

Nota: Obtenido mediante Sultana et al., (2023).

Mediante la tabla 41, se obtiene que el poder calorífico del biocarbón obtenidos de lodos cartoneros con un total de 23,17 MJ/kg, tiene un cercano valor al carbón mineral y en mayor que el carbón vegetal, esto sustenta a que es un producto que es catalogado como una alternativa de fuente de energía. Esto demuestra que el biochar puede convertirse en una opción energética sostenible para utilizar los residuos industriales en la compañía Cartonera Orense.

### **3.3. Presupuesto.**

Se elabora el presupuesto estimado del método propuesto de pirólisis de residuos de cartón y papel como fuente de energía para la empresa de estudio, como se observa en la tabla 42.

**Tabla 42.**  
*Presupuesto de inversión*

<b>Subgrupo</b>	<b>Rubro</b>	<b>Costo (\$)</b>
<b>Maquinaria y Equipos Principales</b>	Planta de pirólisis BLJ-6 (anexo J).	\$ 58,000.00
	Sistema de tratamiento de gases.	\$ 8,700.00
	Sistema de enfriamiento y condensación.	\$ 5,500.00
<b>Personal y Capacitación</b>	Sistema de almacenamiento de biochar.	\$ 1,900.00
	Sueldos de 2 trabajadores (\$500 c/u).	\$ 1,000.00
	Capacitación de personal.	\$ 1,500.00
<b>Instalación y Modificación</b>	Equipos de seguridad para trabajadores.	\$ 1,000.00
	Instalación de la planta.	\$ 4,000.00
	Modificación de infraestructura.	\$ 3,000.00
	Suministro eléctrico y cableado.	\$ 2,000.00
<b>Monitoreo y Seguridad</b>	Herramientas de instalación.	\$ 800.00
	Sistema de monitoreo y control.	\$ 1,600.00
	Sistema de ventilación.	\$ 1,400.00
	Seguro de maquinaria y planta.	\$ 900.00
	Costo de investigación.	\$ 1,000.00
	Análisis de laboratorio.	\$ 400.00
	Documentación y permisos.	\$ 800.00
<b>Mantenimiento Inicial</b>	Publicación de resultados.	\$ 100.00
	Mantenimiento inicial de planta	\$ 1,600.00
	<b>Subtotal</b>	<b>\$ 95,200.00</b>
	Imprevistos (5%)	\$ 4,760.00
<b>Total de inversión</b>		<b>\$ 99,960.00</b>

Nota: Elaborado por el autor.

Con esta distribución, el presupuesto total es de \$95,200.00, además se reserva una parte para gastos imprevistos o ajustes necesarios lo que da un total de \$99,960.00 para la aplicación de la propuesta. Esto permite conocer su viabilidad, para una futura aplicación en la empresa cartonera a partir de los indicadores de inversión VAN, TIR, periodo de recuperación y relación costo – beneficio.

### 3.4. Análisis financiero

Se realiza una caja de flujo en relación con los ingresos para el departamento de ambiente, seguridad y salud ocupacional, esto permite obtener un flujo neto de caja, que al adicionar la inversión del proyecto para conseguir el flujo acumulado como se observa la tabla 43.

**Tabla 43.**  
*Flujo de caja neto.*

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
<b>Inversión del proyecto</b>	<b>-\$99,960.00</b>					
<b>Flujo neto de caja</b>	<b>\$ -99,960.00</b>	<b>\$ 27,750.00</b>	<b>\$ 30,422.50</b>	<b>\$ 33,187.80</b>	<b>\$ 36,052.25</b>	<b>\$ 39,021.11</b>
<b>Flujo acumulado</b>		\$ -72,210.00	\$ -41,787.50	\$ -8,599.70	\$ 27,452.55	\$ 66,473.66

Nota: Elaborado por el autor.

A partir de la caja de flujo se obtengan los distintos indicadores de inversión como la tasa interna de retorno (TIR), el valor actual neto (VAN), período de recuperación  $P_b$  y la relación costo – beneficio.

#### 3.4.1. Indicadores de inversión.

- **Costo de capital.**

Se ha establecido un costo de capital de 15%, lo cual representa el retorno mínimo que la inversión debe generar para ser viable.

$$\text{Tasa de interés } (k) = 15\%$$

- **Tasa interna de retorno (TIR).**

Mediante el cálculo de los valores de la caja de flujo, se consigue una tasa interna de retorno (TIR) de 18.52% que es mayor a la tasa de interés que es de 15%, entonces, se considera a la inversión como viable considerando el porcentaje de riesgo otorgando un cumplimiento de los requisitos.

$$TIR = \sum_{T=0}^n \frac{F_n}{(1+i)^n} = 0$$

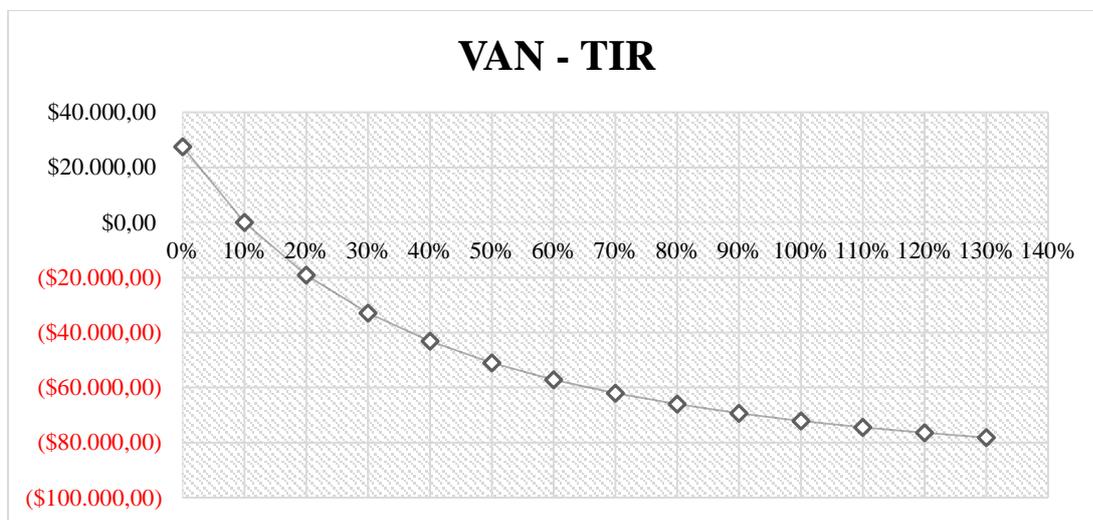
- **Valor actual neto (VAN).**

Para el valor actual neto, se obtiene un monto de \$9,009.00, se indica que la aplicación del trabajo de investigación es rentable, esto mediante el cálculo de la inversión inicial con los flujos futuros con la tasa de interés del 15%, esto señala que el proyecto es viable.

$$VAN = -I_0 + \sum_{n=1}^n \frac{C_n}{(1+r)^n} = 0$$

**Figura 59.**

Gráfica de VAN y TIR.



Nota: Elaborado por el autor.

En la figura 59, se resalta una gráfica exponencial donde el punto de cada TIR con relación al VAN establecido, donde se visualiza que el valor neto actual de \$9,009 con una tasa interna de retorno de un 18.52%.

- **Período de recuperación (PB).**

La inversión inicial es recuperada en un periodo de 3.26 años, lo que indica que, durante el cuarto año de actividades después de la aplicación de la propuesta de pirólisis, se consigue que la generación de beneficios inicia dentro de esta fecha, por lo tanto, es evidencia un margen aceptable para este proyecto.

$$\text{Período de recuperación (pb)} = 3 \text{ años} + \frac{\$ - 8,599.70}{\$ 36,052.25} \gg 3.24 \text{ años}$$

- **Relación costo – beneficio.**

Con una relación de B/C de 1.0435, la inversión es rentable ya que el ratio es superior a 1. Es decir que, por cada dólar invertido, el proyecto llega a generar un retorno positivo neto, aunque moderado.

$$\text{Costo – beneficio } (b/c) = \frac{\text{Suma de ingresos}}{\text{Costos + inversión}}$$

$$\text{Costo – beneficio } (b/c) = \frac{\$ 216,252.80}{\$ 207,243.69} \gg 1.0435$$

Se refleja mediante el análisis financiero, que la propuesta ha demostrado ser viable y factible mediante indicadores con un VAN positivo junto a un TIR de 18.52% por ser mayor a la tasa de interés (15%), la recuperación del capital estimado se encuentra en un periodo de 3.26 años y como último, su relación costo – beneficio se ha calculado, dando un valor de 1.0435 que al ser mayor a 1, se considera como aceptable el proceso pirolítico explicado en el trabajo de investigación a la empresa Cartonera Orense.

### **3.5. Marco de discusión**

Con el trabajo de investigación se consigue información sobre los procesos termoquímicos que se evidencia en la literatura existentes en donde se detalla la conversión de residuos a formas de suministro energético, de forma especial, esto tiene una relación con el objetivo de la investigación dirigido a la empresa Cartonera Orense. Por lo tanto, se establece un procedimiento de revisión bibliométrico para la obtención de fuentes en base criterios de selección de documentos como es la estrecha relación con el tema de investigación y a sus variables que son los procesos pirolíticos y el reciclaje de residuos industriales. Con los artículos que han sido seleccionados que es un total de 45 documentos teniendo en cuenta la declaraciones PRISMA que ofrece una secuencia de filtrado o cribado, se condujo al desarrollo de redes de interrelación entre países, además de la citas por parte de los autores y de la coocurrencia de palabras claves dentro de las investigaciones mediante el uso de herramientas se establezcan gráficas pertinentes a la información deseada como es vosviewer, esto permite responder a las preguntas planteadas en el estado del arte mediante toda una construcción de información de sustento.

Con los artículos con relación al tema de investigación, se inicia como el método multicriterio de toma de decisiones (MCDM) a partir de una metodología AHP o conocido como proceso analítico jerárquico que es presentado para la evaluación de las técnicas

obtenidos de la revisión bibliométricos y estructuradas dentro de una matriz referencial, entre las técnicas se encuentra la pirólisis (PL), los análisis termogravimétricos (AT), entre otros que son registrados para su posible aplicación al trabajo de estudio planteado para la empresa Cartonera Orense. Por ejemplo, el método de pirólisis presentó un valor de importancia del 24,91% y el análisis termogravimétrico mostró un valor del 24,45%, lo que evidencia su adecuación a los propósitos de la investigación.

Con la aplicación de un enfoque cuantitativo, tiene como fin, la obtención de datos cuantificables que permita una toma de decisión en el momento de la elaboración del proceso pirolítico propuesto, mediante la verificación de los resultados de la recolección de datos y de las evaluaciones aplicadas a los residuos otorgando cálculos específicos con relación a la empresa Cartonera Orense (Alguliyev et al., 2025).

Para el marco metodológico, se indicó que el estudio es no experimental de tipo transversal, lo que resalta a que sus variables no son alteradas y se mantienen predefinidas en todo momento, para la muestra se escogió por un muestreo probabilístico dirigido a los trabajadores del departamento de ambiente de la empresa, con esto se obtuvo un total de 20 personas que representan a la población de estudio en donde se ejecutó una técnica de recolección de datos como es la encuesta con la ayuda de cuestionario de preguntas cerradas en donde se implican 5 dimensiones con sus respectivos indicadores para la obtención de la evidencia sobre la gestión de los residuos de forma actual y de la percepción por parte de los empleados a métodos nuevos como es la pirólisis (Hernández & Mendoza, 2018).

El correcto desarrollo de la validez del instrumento mediante la validación por juicio de criterios de expertos seleccionados por una secuencia de expertos, y de su fiabilidad con el coeficiente de alfa de Cronbach que ayudó a la consistencia de los resultados aportados dentro de la plataforma Google Forms, para una mejor representación de los resultados que han sido cuantificados de forma automática con la demostración de las respectivas y gráficas, sin embargo, es necesario del uso de programas como SPSS 25 para un análisis detallado de los resultados obtenidos con un método deductivo. Como último se cumplió con un proceso de verificación de la hipótesis con el uso de pruebas de normalidad para la identificación de la distribución de los datos.

Durante el proceso de prueba de la herramienta de recopilación de datos se deben tener en cuenta los aspectos éticos a nivel nacional e internacional para una correcta ejecución de esta sin afecta a la integridad y salud de los participantes dentro del tema de investigación (Kurihara et al., 2024). Además, la confiabilidad se determinó mediante la evaluación de

expertos seleccionados, esto se puede reflejar en el anexo C, con esta misma selección de los participantes se basó en criterios estrictos, dando prioridad a expertos con una formación académica superior no inferior a un nivel 4 de educación. En este aspecto, en la educación, se obtiene experiencia trabajando en el campo ambiental y una sólida carrera como escritor científico. Se excluyeron personas sin experiencia en la industria del cartón. La validez del instrumento respalda la coherencia de las dimensiones, indicadores e ítems de la evaluación, destacando la coherencia significativa en las calificaciones proporcionadas por los evaluadores, mejorando así la solidez de la estructura del formulario. Para la verificación de la hipótesis se planteó el uso de la prueba de Kolmogorov – Smirnov en donde se registró los datos resultantes para que se indica la distribución para una de las dimensiones así permitiendo la verificación de hipótesis específicas, en donde 4 secciones indicaron las aceptaciones de la hipótesis alternativa mediante su significancia que es menor a 0,05, así cumpliendo con que el proceso pirolítico es aplicable para el reciclaje de residuos y usado como fuente de energía.

Según Jwaida et al. (2024), los residuos generados en la industria papelera, como el cartón, contienen una gran cantidad de celulosa (82,19%), hemicelulosa (7,11%) y lignina (7,65%), que pueden descomponerse fácilmente por pirólisis la estabilidad térmica es ventajosa para procesos como De media, Cartonera Orense genera 2 toneladas de residuos de cartón y papel cada 12 horas, pero los errores de fabricación pueden sumar 3,5 toneladas. Esto significa una gran cantidad de residuos no utilizados, estos lodos no tienen ningún uso funcional y pone en relieve el potencial de utilizar tecnologías como la pirólisis para valorizar estos residuos, convertirlos en una fuente de energía renovable y promover una economía circular.

Como propuesta de método de pirólisis, se usa un método de torrefacción en donde se llega a un límite de 200 a 300 °C, debido a que tiene como finalidad, la obtención de biocarbón y que su atmósfera de proceso no presente oxígeno obtenido del aire, sino que por su generación al ser expulsado junto al nitrógeno y al dióxido de carbono, lo que preparó a que su concentración sea bajo de estos elementos y que se mantengan la gran cantidad de carbono existente para que su poder calorífico tenga un aumento debido a que los lodos cartoneros están compuestos de lignocelulosa que se sustenta como un producto abundante y durable (Mpungu et al., 2024). Estos factores influyen en la eficiencia energética y la homogeneidad del producto final y promueven la adopción del proceso de calcinación para optimizar su rendimiento (Chen et al., 2023). En el caso de los lodos de cartón y papel, ricos en celulosa y lignina, el proceso de torrefacción produce coque o biocarbón. El proceso está realizado en el rango de 1-2 horas con una temperatura de 250-300 °C a 1,2 atmósferas, según sea la cantidad de los residuos.

Para los residuos generados, que son los lodos cartoneros, se ha empleado un diseño conectado que inicia con la alimentación del reactor con el residuos y del combustible para los quemadores del mismo, esto provoca que se obtengan el sólido residual junto a los gases, mientras que el sólido que es el biocarbón es transportado por un sistema de tornillo a la máquina peletizadora para su almacenamiento, mientras que los gases son condensados y se separa el bio – aceite y el gas de síntesis que tiene como finalidad la alimentación del propio reactor para que autogenera su propio combustible, para los gases generados de la combustión son enviados al sistema de tratamiento de gases para la reducción del impacto ambiental por parte de gases nocivos.

Con el análisis termogravimétrico elaborado por un laboratorio en específico, los resultados obtenidos demostraron que el material que es el lodo de cartón y papel a una temperatura de 300 °C se obtiene una disminución del contenido a un total del 75% a partir del proceso térmico y se consigue el producto esperado en la investigación.

Al examinar de cerca el biocarbón pirolítico, se demuestra que tiene sustancias volátiles en un 18,4%, lo que significa una expulsión promedio de gas al calentarse, lo que potencialmente aumenta las demandas de energía El carbón vegetal, compuesto por un 67,4% de carbono puro, posee una gran resistencia térmica y un valor de combustión impresionante, lo que beneficia su utilización como fuente de energía., el contenido de cenizas del 14,2% indica una presencia moderada de minerales incombustibles.

Como parte del análisis elemental en donde se demuestra que hay un porcentaje de carbono este es comprendido de un porcentaje del 72.23%, además de un respaldo de su solidez con una presencia de hidrógeno en un 1.5%, el nitrógeno presente de 6.53% que añade a el proceso tenga un mayor poder calorífico, sin embargo, se da la presencia de gases nocivos como el NOx, la composición de oxígeno de una proporción del 19.74% permite que el producto pueda captar otros compuestos, con todo esto se presenta que el poder calorífico con el uso de la fórmula de Dulong está a un valor de 23.17% que un poco más bajo que el carbón mineral y sobrepasa a poder calorífico promedio del carbón vegetal.

El capital se recuperó en 3.26 años, lo que significa que la empresa es económicamente viable y lucrativa, generando ventajas adicionales a partir del año siguiente en adelante.

## CONCLUSIONES

1. Se aplicó una revisión bibliométrica que otorgó 45 artículos con relación al tema de investigación, donde se logra conocer el campo científico de los residuos industriales mediante la coocurrencia e interrelación de las fuentes, evidencian el uso de procesos pirolíticos para obtención de biochar como fuente de energía, además, se destaca que el uso de un método (MCDM) como el AHP, donde se obtuvo las técnicas como el análisis termogravimétrico (AT) y sistemas pirolítico (PL) destacan por una mayor aplicación y ponderación del 49.36% como total de la agrupación de técnicas.
2. Con la elección de un enfoque cuantitativo, del tipo no experimental, se ofrecen que los resultados obtenidos por la muestra de 20 trabajadores mediante una técnica de encuesta con un cuestionario de 21 interrogantes tengan respuestas medibles para su cálculo de la fiabilidad mediante programas como IBM SPSS Statistic 25 mediante pruebas de normalidad para verifiquen la distribución de los resultados.
3. Con la elaboración de un método pirólisis, diseñado mediante programa como el AutoCAD, para una representación de forma visual del proceso de transformación de los lodos cartoneros a una forma de bioenergía para la empresa de estudio. Es por esto, que con los resultados de la encuesta se obtiene un alfa de Cronbach de 0.82 se resalta una alta consistencia con la información obtenida, además, con la dependencia de análisis de laboratorio se consigue las propiedades que se obtiene para su uso como fuente de energía sustentable. Los resultados indican un biochar con un 67.4% de carbono fijo y bajos niveles de humedad a una temperatura de 300 °C, lo cual refuerza su capacidad de combustión y eficiencia energética. Adicionalmente, el contenido de carbono (72.23%) y el bajo porcentaje de azufre (<0.01%) destacan la calidad del producto para aplicaciones energéticas con un poder calorífico de 23.17 MJ/kg. La propuesta del proceso de torrefacción para la obtención de biochar como subproducto sustentan una alternativa viable en la gestión de residuos como fuente de energía con una inversión de \$ 99,960.00 en un periodo de recuperación de 3.24 años en la empresa Cartonera Orense.

## RECOMENDACIONES

1. Para avanzar en el desarrollo de tecnologías eficaces en el tratamiento de residuos industriales, es recomendable que se profundice la investigación sobre los procesos termoquímicos en relación con la reducción de residuos de diferente tipo, esto permite que el proceso pirolítico pueda ser optimizado con la adición de catalizadora y de nuevos aditivos, por lo tanto, una continuación del estado del arte se considera como una actividad rentable.
2. Se recomienda la continuación de metodologías cuantitativa para investigaciones similares a futuro, esto para mantener de forma precisa la obtención de datos numéricos sobre los residuos industriales generados dentro de la empresa de estudio, además se resalta que el uso de técnicas de recolección de datos se amplie a una muestra poblacional más amplia para que se otorgue una mejor perspectiva por parte de los que conforman a la empresa Orense, con el fin de identificar puntos de mejora en el ámbito medio ambiental.
3. Es recomendable que el diseño pirolítico aplicado sea acompañado de simulaciones futuras de pruebas pilotos que permitan identificar el comportamiento del proceso de una forma óptima, y se planteen acciones de mejoras a largo plazo, además que las pruebas tanto a los lodos cartoneros como a biochar obtenido del proceso pirolítico para verificar si la composición no se haya alterado provocando que los resultados se vean comprometidos, provocando que el rendimiento de la fuente de energía no sea la más óptima.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abdallah, R., Juaidi, A., Assad, M., Salameh, T., & Manzano-Agugliaro, F. (2020). Energy Recovery from Waste Tires Using Pyrolysis: Palestine as Case of Study. *Energies*, *13*(7), 1817. <https://doi.org/10.3390/en13071817>
- Acosta-Rubio, D., Castro-Camacho, L., & Moreno-Arias, C. A. (2021). Pirólisis rápida para producir biocombustibles con residuos sólidos urbanos: estudio de caso, Madrid, Cundinamarca. *Gestión y Ambiente*, *24*(Sup13), 47–58. <https://doi.org/10.15446/ga.v24nSup13.97273>
- Adamczyk, B., Dudek, M., Zych, A., Gajek, M., Sitarz, M., Ziąbka, M., Dudek, P., Grzywacz, P., Witkowska, M., Kowalska, J., Mech, K., & Sokołowski, K. (2024). Investigating the Effects of the Physicochemical Properties of Cellulose-Derived Biocarbon on Direct Carbon Solid Oxide Fuel Cell Performance. *Materials 2024, Vol. 17, Page 3503*, *17*(14), 3503. <https://doi.org/10.3390/MA17143503>
- Afash, H., Ozarisoy, B., Altan, H., & Budayan, C. (2023). Recycling of Tire Waste Using Pyrolysis: An Environmental Perspective. *Sustainability*, *15*(19), 14178. <https://doi.org/10.3390/su151914178>
- Afrah, B. D., Riady, M. I., Arsadha, J. P., Rimadhina, R., Cundari, L., & ‘Izzah, R. Z. (2024). Effect of Pyrolysis Temperature and Biomass Composition on Bio-Oil Characteristics. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, *25*(3), 264–274. <https://doi.org/10.12912/27197050/181152>
- Ahmad, N., Alias, F. A., & Razak, N. (2023). Understanding population and sample in research: key concepts for valid conclusions. *SIGCS: E-Learning*, *6*, 19–24.
- Ahmetli, G., Ozgan, A., Onen, V., Kalem, M., Goktepli, G., & Yel, E. (2024). Marble processing effluent treatment sludge in waste poly (ethylene terephthalate) pyrolysis as catalyst–II: recovery from pyrolytic fluids. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *21*(7), 6021–6042. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05388-5>
- Akinsemolu, A. A., Idowu, A. M., & Onyeaka, H. N. (2024). Recycling Technologies for Biopolymers: Current Challenges and Future Directions. *Polymers*, *16*(19), 2770. <https://doi.org/10.3390/polym16192770>
- Alguliyev, R., Aliguliyev, R., & Sukhostat, L. (2025). An approach for assessing the functional vulnerabilities criticality of CPS components. *Cyber Security and Applications*, *3*, 100058. <https://doi.org/10.1016/j.csa.2024.100058>
- Amaya, J., Coello, S., Crespo, T., Hidalgo, J., Jervis, F., Moreira, C., & Soto, M. (2020). Waste to Energy Potential of Domestic Waste Cooking Oil in Guayaquil: A review. *Waste to Energy Potential of Domestic Waste Cooking Oil in Guayaquil*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.485>
- Asghar, A., Liu, C.-G., Ali, I., Khan, A. Z., Zhu, H., Wang, N., Nawaz, M., Tabish, T. A., Mehmood, M. A., & Rasool, R. T. (2023). Bioenergy potential of *Saccharum bengalense* through pyrolysis, reaction kinetics, TG-FTIR-GCMS analysis of pyrolysis products, and

- validation of the pyrolysis data through machine learning. *Chemical Engineering Journal*, 465, 142930. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142930>
- Baena Vallejo, G. A., García Quintero, C. S., Duque Restrepo, M. C., & Velásquez Muñoz, D. S. (2020). Perspectivas investigativas en torno a las parejas sin hijos y su relación con el concepto de “familia.” *Interdisciplinaria Revista de Psicología y Ciencias Afines*, 37(2), 175–193. <https://doi.org/10.16888/interd.2020.37.2.11>
- Beston-Group. (2024). *Máquina de pirólisis pequeña*. Beston-Group. <https://www.bestongroup.com/es/small-pyrolysis-machine/>
- Bhatnagar, A., Tolvanen, H., & Konttinen, J. (2020). Potential of stepwise pyrolysis for on-site treatment of agro-residues and enrichment of value-added chemicals. *Waste Management*, 118, 667–676. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2020.09.022>
- Burneo, D., Cansino, J. M., & Yñiguez, R. (2020). Environmental and Socioeconomic Impacts of Urban Waste Recycling as Part of Circular Economy. The Case of Cuenca (Ecuador). *Sustainability*, 12(8), 3406. <https://doi.org/10.3390/su12083406>
- Campanelli, L. (2024). Tuning up the Kolmogorov–Smirnov test for testing Benford’s law. *Communications in Statistics - Theory and Methods*. <https://doi.org/10.1080/03610926.2024.2318608>
- Cao, H., Luo, Q., He, Y., Liang, J., Lin, S., Evrendilek, F., Qi, J., Yang, Z., Zhong, S., Liu, J., Yang, C., & Huang, W. (2024). Gas-to-Biochar Byproducts of Pyrolysis and Gasification of Star Anise Biomass. *International Journal of Energy Research*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/3457219>
- Chanda, R. K., Jahid, T., Hassan, M. N., Yeasmin, T., & Biswas, B. K. (2024). Cauliflower stem-derived biochar for effective adsorption and reduction of hexavalent chromium in synthetic wastewater: A sustainable approach. *Environmental Advances*, 15, 100458. <https://doi.org/10.1016/J.ENVADV.2023.100458>
- Chen, L., Chen, X., Zhao, Y., Xie, X., Yang, S., Hua, D., Wang, C., & Li, T. (2023). Effect of Torrefaction on the Physiochemical Characteristics and Pyrolysis of the Corn Stalk. *Polymers* 2023, Vol. 15, Page 4069, 15(20), 4069. <https://doi.org/10.3390/POLYM15204069>
- Cuevas, A. B., Leiva-Candia, D. E., & Dorado, M. P. (2024). An Overview of Pyrolysis as Waste Treatment to Produce Eco-Energy. *Energies* 2024, Vol. 17, Page 2852, 17(12), 2852. <https://doi.org/10.3390/EN17122852>
- de Oliveira, D. M., de Bomfim, A. S. C., Benini, K. C. C. de C., Cioffi, M. O. H., Voorwald, H. J. C., & Rodrigue, D. (2023). Waste Paper as a Valuable Resource: An Overview of Recent Trends in the Polymeric Composites Field. *Polymers*, 15(2), 426. <https://doi.org/10.3390/polym15020426>
- Del Cid-Pérez, A., Méndez, R., & Sandoval-Recintos, F. (2011). *Investigación: Fundamentos y metodología* (O. Hugo Rivera, Ed.; Segunda Edición). PEARSON EDUCACIÓN. <https://mitrabajodegrado.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/11/cid-investigacion-fundamentos-y-metodologia.pdf>

- Ferreira, M. F. P., Oliveira, B. F. H., Pinheiro, W. B. S., Correa, N. F., França, L. F., & Ribeiro, N. F. P. (2020). Generation of biofuels by slow pyrolysis of palm empty fruit bunches: Optimization of process variables and characterization of physical-chemical products. *Biomass and Bioenergy*, *140*, 105707. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105707>
- Ferronato, N., Baltrocchi, A. P. D., Romagnoli, F., Calle Mendoza, I. J., Gorrity Portillo, M. A., & Torretta, V. (2023). Environmental Life Cycle Assessment of biomass and cardboard waste-based briquettes production and consumption in Andean areas. *Energy for Sustainable Development*, *72*, 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.12.005>
- Ferronato, N., Calle Mendoza, I. J., Gorrity Portillo, M. A., Conti, F., & Torretta, V. (2022). Are waste-based briquettes alternative fuels in developing countries? A critical review. *Energy for Sustainable Development*, *68*, 220–241. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.03.013>
- Fukuyama, H., & Tan, Y. (2023). Environmental Protection and Economic Development: Research Progress of Eco-Efficiency. *Sustainability*, *15*(19), 14309. <https://doi.org/10.3390/su151914309>
- Graça, J., Kwapinska, M., Murphy, B., Duggan, T., Leahy, J. J., & Kelleher, B. (2024). Pyrolysis, a recovery solution to reduce landfilling of residual organic waste generated from mixed municipal waste. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(21), 30676–30687. <https://doi.org/10.1007/S11356-024-33282-1/TABLES/8>
- Guo, X., Zhou, L., Shi, B., Li, Y., Lin, S., Li, Y., Sun, J., Liu, G., Yin, J., & Zhang, C. (2024). Pyrolytic hydrocarbon generation characteristics of the Chang 7 shale based on different experimental methods: Implications for shale oil and gas in the Ordos Basin. *Geological Journal*, *59*(8), 2175–2189. <https://doi.org/10.1002/gj.5002>
- Harif, S., Aboulhassan, M. A., & Bammou, L. (2021). Overview of wastewater characteristics of cardboard industry. *Scientific Study & Research. Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, *22*(1), 1–11.
- Hernández-Romero, I. M., Niño-Caballero, J. C., González, L. T., Pérez-Rodríguez, M., Flores-Tlacuahuac, A., & Montesinos-Castellanos, A. (2024). Waste management optimization with NLP modeling and waste-to-energy in a circular economy. *Scientific Reports*, *14*(19859). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69321-7>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Research methodology: quantitative, qualitative, and mixed routes*. 752. [https://books.google.com/books/about/METODOLOG%C3%8DA\\_DE\\_LA\\_INVESTIGACI%C3%93N.html?id=5A2QDwAAQBAJ](https://books.google.com/books/about/METODOLOG%C3%8DA_DE_LA_INVESTIGACI%C3%93N.html?id=5A2QDwAAQBAJ)
- Hossain, Md. S., Paul, S., Das, B. K., Das, P., & Nuhash, S. S. (2024). Techno-economic environmental feasibility analysis and investigation of engine performance, combustion, and emission characteristics using co-pyrolytic oil derived from tea waste and potato skin. *Applied Energy*, *377*, 124451. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124451>
- Instituto Geográfico Militar. (2023). *Catálogo de Metadatos - Instituto Geográfico Militar (IGM-Ecuador)*. Catálogo de Metadatos. <https://www.geoportaligm.gov.ec/catalogo/srv/spa/catalog.search#/map?facet.q=topicCa>

t%2FnationalProject&resultType=details&any=santa%20elena&fast=index&\_content\_t  
ype=json&from=1&to=20&sortBy=relevance

- Jagdale, M., Gangil, S., Jadhav, M., Sahu, P., Durga, L., Ghodke, P. K., & Basak, S. (2024). Biopolymeric degradation of jute sticks under pyrolytic thermal stresses. *Process Safety and Environmental Protection*, 189, 517–529. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.06.096>
- Jeremiah, M., Kabeyi, B., & Olanrewaju, O. A. (2023). Review and Design Overview of Plastic Waste-to-Pyrolysis Oil Conversion with Implications on Energy Transition. *Journal of Energy*, 2023(1), 1821129. <https://doi.org/10.1155/2023/1821129>
- Jwaida, Z., Dulaimi, A., Alyhya, W., Algretawee, H., & Al-Busaltan, S. (2024). Recycling and utilization of paper sludge ash -current status review and future perspectives. *Sustainable Materials and Technologies*, 40, e00960. <https://doi.org/10.1016/J.SUSMAT.2024.E00960>
- Kataki, R., Borkotoki, B., Bora, N., & Maheshwari, S. (2024). VALORIZATION OF PULP AND PAPER MILL BIO-RESIDUES TO BIOCHAR FOR ENVIRONMENTAL AND BUSINESS SUSTAINABILITY IN TOTALITY. *IPPTA: Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association*, 36(1), 179–181. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85198573158&partnerID=40&md5=66fdce8f0f22998314a6d71912f99204>
- Khairy, M., Amer, M., Ibrahim, M., Ookawara, S., Sekiguchi, H., & Elwardany, A. (2024). The influence of torrefaction on the biochar characteristics produced from sesame stalks and bean husk. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(15), 17127–17148. <https://doi.org/10.1007/S13399-023-03822-9/FIGURES/12>
- Khol'kin, A. I., Patrusheva, T. N., Akat'eva, L. V., & Kalinin, V. A. (2021). From Extraction-Pyrolytic to Extraction-Additive Technology. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 55(4), 760–767. <https://doi.org/10.1134/S0040579521040096>
- Kodera, Y., Yamamoto, T., & Ishikawa, E. (2021). Energy- and economic-balance estimation of pyrolysis plant for fuel-gas production from plastic waste based on bench-scale plant operations. *Fuel Communications*, 7, 100016. <https://doi.org/10.1016/J.JFUECO.2021.100016>
- Korus, A., Jagiello, J., Jensen, C. D., Sárossy, Z., Ravenni, G., & Benedini, L. (2024). Advantages of dual CO<sub>2</sub> & O<sub>2</sub> adsorption model for assessment of micropore development in biochar during two-stage gasification. *Renewable Energy*, 225, 120293. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2024.120293>
- Kumar, A., Jamro, I. A., Rong, H., Kumari, L., Laghari, A. A., Cui, B., Aborisade, M. A., Oba, B. T., Nkinahamira, F., Ndagijimana, P., S., Bhagat, W. A., & Guo, D. (2024). Assessing bioenergy prospects of algal biomass and yard waste using an integrated hydrothermal carbonization and pyrolysis (HTC–PY): A detailed emission–to–ash characterization via diverse hyphenated analytical techniques and modelling strategies. *Chemical Engineering Journal*, 492, 152335. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152335>
- Kumar, V., & Verma, P. (2024). Pulp-paper industry sludge waste biorefinery for sustainable energy and value-added products development: A systematic valorization towards waste

- management. *Journal of Environmental Management*, 352, 120052. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120052>
- Kurihara, C., Kerpel-Fronius, S., Becker, S., Chan, A., Nagaty, Y., Naseem, S., Schenk, J., Matsuyama, K., & Baroutsou, V. (2024). Declaration of Helsinki: ethical norm in pursuit of common global goals. *Frontiers in Medicine*, 11, 1360653. <https://doi.org/10.3389/FMED.2024.1360653>
- Kwon, G., Cho, D.-W., Yoon, K., Kim, E., Lee, J., & Song, H. (2024). Pyrolytic conversion of nylon-6 and red mud into N-doped carbon composite and its application into azo-dye degradation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 181, 106619. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106619>
- L. Efiyanti, F.A. Rifa'i, M. Maslahat, D.A. Indrawan, S. Wibowo, S. Darmawan, R. Pari, Y.I. Rahmila, A. Aswandi, C.R. Kholibrina, Djarwanto, S. Komarayati, Gusmailina, G. Pari, & D. Hendra. (2023). Co/ACTIVATED CARBON FROM PARASERIANTHES FALCATA AS A GREEN CATALYSTS FOR PLASTIC WASTE PYROLISIS. *RASAYAN Journal of Chemistry*, 16(03), 1149–1162. <https://doi.org/10.31788/RJC.2023.1638347>
- Lee, J., Kim, S., You, S., & Park, Y.-K. (2023). Bioenergy generation from thermochemical conversion of lignocellulosic biomass-based integrated renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178, 113240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113240>
- Lesiak, P. (2024). Review of Methods for Converting Biomass into Biofuels. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 26, 84–93. <https://doi.org/10.54740/ros.2024.009>
- Lin, X., Guo, Y., Tang, B., Fu, P., Li, H., Zhang, J., & Li, P. (2024). Fast co-pyrolysis of paper mill sludge and corn stover: Relationships between parameters, product distributions, and synergistic interactions. *Industrial Crops and Products*, 213, 118415. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2024.118415>
- Linnenluecke, M. K., Marrone, M., & Singh, A. K. (2020). Conducting systematic literature reviews and bibliometric analyses. *Australian Journal of Management*, 45(2), 175–194. [https://doi.org/10.1177/0312896219877678/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177\\_0312896219877678-FIG7.JPEG](https://doi.org/10.1177/0312896219877678/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_0312896219877678-FIG7.JPEG)
- Liu, C., Luan, P., Li, Q., Cheng, Z., Xiang, P., Liu, D., Hou, Y., Yang, Y., & Zhu, H. (2021). Biopolymers Derived from Trees as Sustainable Multifunctional Materials: A Review. *Advanced Materials*, 33(28). <https://doi.org/10.1002/adma.202001654>
- Liu, H., Liu, H., Hu, J., Zhong, W., Hu, Z., & Wang, H. (2024). Comprehensive study of alkali lignin pyrolysis catalyzed by composite metal-modified molecular sieves for the preparation of hydrocarbon liquid fuels. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 181, 106608. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106608>
- Mahapatra, P. M., Aech, S., Mandal, P. K., & Panda, A. K. (2024). Pyrolysis of multilayered plastic packets to hydrocarbon fuel feedstock: Thermal degradation behaviour, kinetics and thermodynamic analysis, and semi-batch studies. *Journal of the Energy Institute*, 115, 101690. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2024.101690>

- Mamad Gandidi, I., Suryadi, E., Mardawati, E., Rustam Kendarto, D., & Agung Pambudi, N. (2022). Stepwise Pyrolysis by LBCR Downstream to Enhance of Gasoline Fraction of Liquid Fuel from MMSW. *Energy Engineering*, *119*(3), 1169–1178. <https://doi.org/10.32604/ee.2022.018821>
- Manea, E. E., & Bumbac, C. (2024). Sludge Composting—Is This a Viable Solution for Wastewater Sludge Management? *Water (Switzerland)*, *16*(16), 2241. <https://doi.org/10.3390/w16162241>
- Mbuagbaw, L., Lawson, D. O., Puljak, L., Allison, D. B., & Thabane, L. (2020). A tutorial on methodological studies: the what, when, how and why. *BMC Medical Research Methodology*, *20*(1), 226. <https://doi.org/10.1186/s12874-020-01107-7>
- McLeod, L. J., Kitson, J. C., Dorner, Z., Tassell-Matamua, N. A., Stahlmann-Brown, P., Milfont, T. L., & Hine, D. W. (2024). Environmental stewardship: A systematic scoping review. *PLOS ONE*, *19*(5), e0284255. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284255>
- Ministerio de Energía y Minas. (2022). *Factor de Emisión de Co2 Sistema Nacional Interconectado de Ecuador 2022*. <https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/wp-1692720103183.pdf>
- Mohanty, A., Ajmera, S., Chinnam, S., Kumar, V., Mishra, R. K., & Acharya, B. (2024). Pyrolysis of waste oils for biofuel production: An economic and life cycle assessment. *Fuel Communications*, *18*, 100108. <https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2024.100108>
- Mohanty, A. K., Vivekanandhan, S., Das, O., Romero Millán, L. M., Klinghoffer, N. B., Nzihou, A., & Misra, M. (2024). Biocarbon materials. *Nature Reviews Methods Primers*, *4*(1), 19. <https://doi.org/10.1038/s43586-024-00297-4>
- Moreno, M. E. P., Yucra, D. G. C., Arancibia, N. S., & Saavedra, L. M. R. (2023). Planta de transformación de plásticos residuales en combustibles sintéticos. *South Florida Journal of Development*, *4*(9), 3518–3532. <https://doi.org/10.46932/sfjdv4n9-013>
- Mpungu, I. L., Maube, O., Nziu, P., Mwasiagi, J. I., Dulo, B., & Bongomin, O. (2024). Optimizing Waste for Energy: Exploring Municipal Solid Waste Variations on Torrefaction and Biochar Production. *International Journal of Energy Research*, *2024*(1), 4311062. <https://doi.org/10.1155/2024/4311062>
- Nath, B., Bowtell, L., Chen, G., Graham, E., & Nguyen-Huy, T. (2024). Pyrolytic Pathway of Wheat Straw Pellet by the Thermogravimetric Analyzer. *Energies*, *17*(15), 3693. <https://doi.org/10.3390/en17153693>
- Nav, T. Z., Pümpel, T., Bosch, D., & Bockreis, A. (2023). Insight into the application of biochars produced from wood residues for removing different fractions of dissolved organic material (DOM) from bio-treated wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, *32*, 103271. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2023.103271>
- Ninkov, A., Frank, J. R., & Maggio, L. A. (2022). Bibliometrics: Methods for studying academic publishing. *Perspectives on Medical Education*, *11*(3), 173–176. <https://doi.org/10.1007/S40037-021-00695-4/TABLES/1>

- Nyarugwe, S. P., & Jespersen, L. (2024). Assessing reliability and validity of food safety culture assessment tools. *Heliyon*, *10*(12), e32226. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E32226>
- Okoye, K., & Hosseini, S. (2024). Understanding Dependent and Independent Variables in Research Experiments and Hypothesis Testing. In *R Programming* (pp. 99–107). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-3385-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-97-3385-9_5)
- Or-Chen, D., Gerchman, Y., Mamane, H., & Peretz, R. (2024). Paper-Mill Wastes for Bioethanol Production in Relation to Circular Economy Concepts: A Review. *Applied Sciences (Switzerland)*, *14*(3). <https://doi.org/10.3390/app14031081>
- Orejuela-Escobar, L. M., Landázuri, A. C., & Goodell, B. (2021). Second generation biorefining in Ecuador: Circular bioeconomy, zero waste technology, environment, and sustainable development: The nexus. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, *6*(2), 83–107. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.01.004>
- Öztürk, O., Kocaman, R., & Kanbach, D. K. (2024). How to design bibliometric research: an overview and a framework proposal. *Review of Managerial Science*, *18*(11), 3333–3361. <https://doi.org/10.1007/S11846-024-00738-0/TABLES/7>
- Palmay, P., Medina, C., & Vargas, K. (2021). Pirólisis de plásticos de invernadero para recuperar ceras líquidas útiles para refinación. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *5*(3), 2463–2476. [https://doi.org/https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v5i3.464](https://doi.org/https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i3.464)
- Pasumarthi, R., Sawargaonkar, G., Kale, S., Kumar, N. V., Choudhari, P. L., Singh, R., Davala, M. S., Rani, C. S., Mutnuri, S., & Jat, M. L. (2024). Innovative bio-pyrolytic method for efficient biochar production from maize and pigeonpea stalks and their characterization. *Journal of Cleaner Production*, *448*, 141573. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141573>
- Ponce, S., Alvarez-Barreto, J., & Almeida, D. (2021). Recent advances in residual biomass conversion into bioenergy and value-added products: A review of the Ecuadorian situation. *ACI Avances En Ciencias e Ingenierías*, *13*(1), 21. <https://doi.org/10.18272/aci.v13i1.1929>
- Prabha, B., Ramesh, D., Sriramajayam, S., & Uma, D. (2024). Optimization of Pyrolysis Process Parameters for Fuel Oil Production from the Thermal Recycling of Waste Polypropylene Grocery Bags Using the Box–Behnken Design. *Recycling 2024, Vol. 9, Page 15*, *9*(1), 15. <https://doi.org/10.3390/RECYCLING9010015>
- Pramono, A. P., Amru, B. A., Rahmani, H. A., Fernanda, S. A., Nugraha, Y., Ramadhan, M. Y. A., Harahap, A. F. P., Fauzantoro, A., Irsyad, N. S., Bahar, M., Puspita, O. S., Zulfa, F., Yati, K., Jufri, M., & Gozan, M. (2022). Nicotiana tabacum var. Virginia Bio Oil-based Pyrolysis Extraction Have Prominence Antimicrobial Potential Compared to Ethanol Heat Reflux Extraction (EHRE). *HAYATI Journal of Biosciences*, *29*(4), 515–525. <https://doi.org/10.4308/hjb.29.4.515-525>
- Rabah, A. A. (2023). Optimization of Syngas Quality for Fischer-Tropsch Synthesis. *Journal of Energy*, *2023*(1), 1842187. <https://doi.org/10.1155/2023/1842187>

- Raček, J., Chorazy, T., Miino, M. C., Vršanská, M., Brtnický, M., Mravcová, L., Kučerík, J., & Hlavínek, P. (2024). Biochar production from the pyrolysis of food waste: Characterization and implications for its use. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37, 101387. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2023.101387>
- Rachel Blanchard, & H. Mekonnen, T. (2024). Valorization of plastic waste via chemical activation and carbonization into activated carbon for functional material applications. *RSC Applied Polymers*, 2(4), 557–582. <https://doi.org/10.1039/D4LP00016A>
- Rachman, A. P., Ichwani, C., Mangkuto, R. A., Pradipta, J., Koerniawan, M. D., & Sarwono, J. (2024). Comparison of multi-criteria decision-making methods for selection of optimum passive design strategy. *Energy and Buildings*, 314, 114285. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2024.114285>
- Redondo-Gómez, C., Quesada, M. R., Astúa, S. V., Zamora, J. P. M., Lopretti, M., & Vega-Baudrit, J. R. (2020). Biorefinery of Biomass of Agro-Industrial Banana Waste to Obtain High-Value Biopolymers. *Molecules*, 25(17). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES25173829>
- Sanchez-Hervas, J. M., Ortiz, I., Márquez, A., Fernández-Fernández, A. M., Canivell, M., & Ruiz, E. (2023). Pirólisis de biomasa y residuos como estrategia de producción sostenible y simbiosis industrial en la comunidad de Madrid (España). *Revista Tecnología En Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i10.7010>
- Sarve, D. T., Dutta, R., Rastogi, A., & Ekhe, J. D. (2022). Valorization of industrial waste lignin via pyrolysis in the presence of additives: Formation, characterization, and application of fuel valued bio-oil and activated char. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99(4), 100398. <https://doi.org/10.1016/J.JICS.2022.100398>
- Setianingsih, T., Susilo, B., Mutrofin, S., Ismuyanto, B., Endaryana, A. N., & Yoniansyah, Y. N. (2022). Influence of sequential pyrolysis methods on the properties of the carbon nanostructure (CNS) from sugarcane leaf biomass. *Journal of Applied Research and Technology*, 20(4), 460–471. <https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2022.20.4.1324>
- Shahrin, M. S., Rahman, M. H. A., Baharom, N. A., Jumat, F., Saad, M. J., Mail, M. F., Zawawi, N. Z., & Suherman, F. H. S. (2024). Design of a pyrolysis system and the characterisation data of biochar produced from coconut shells, carambola pruning, and mango pruning using a low-temperature slow pyrolysis process. *Data in Brief*, 52, 109997. <https://doi.org/10.1016/J.DIB.2023.109997>
- Silva-Martínez, R. D., Sanches-Pereira, A., Ortiz, W., Gómez Galindo, M. F., & Coelho, S. T. (2020). The state-of-the-art of organic waste to energy in Latin America and the Caribbean: Challenges and opportunities. *Renewable Energy*, 156, 509–525. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.056>
- Soares, P. R. L., da Silva, M. G., Luna, J. H. M., Santos, T. M., Santos, L. F. S., Navickiene, S., & dos Santos Freitas, L. (2024). Solid-Phase Extraction of Pesticides in Water Using Corncob Biochar. *Food Analytical Methods*. <https://doi.org/10.1007/s12161-024-02677-8>

- Solis, M., Tonini, D., Scheutz, C., Napolano, L., Biganzoli, F., & Huygens, D. (2024). Contribution of waste management to a sustainable textile sector. *Waste Management*, *189*, 389–400. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.08.037>
- Steblevskaya, N. I., Medkov, M. A., & Belobeletskaya, M. V. (2022). The Use of the Extraction–Pyrolytic Method for the Production of Oxide Functional Films and Coatings. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, *56*(5), 934–941. <https://doi.org/10.1134/S0040579522050177>
- Suherman, S., Nurwijaya, Y., Wahyuni, E. T., Siswanta, D., Morita, K., & Oki, Y. (2021). Effect of ammonium citrate concentration variation on the carbon dots colistin modification for Escherichia coli detection. *Moroccan Journal of Chemistry*, *9*(4), 754–761. <https://doi.org/10.48317/IMIST.PRSM/morjchem-v9i3.23191>
- Sultana, R., Banik, U., Nandy, P. K., Huda, M. N., & Ismail, M. (2023). Bio-oil production from rubber seed cake via pyrolysis: Process parameter optimization and physicochemical characterization. *Energy Conversion and Management: X*, *20*, 100429. <https://doi.org/10.1016/J.ECMX.2023.100429>
- Thacker, L. R. (2020). What Is the Big Deal About Populations in Research? *Progress in Transplantation*, *30*(1), 3–3. <https://doi.org/10.1177/1526924819893795>
- Toro, R., Peña-Sarmiento, M., Avendaño-Prieto, B. L., Mejía-Vélez, S., & Bernal-Torres, A. (2022). Análisis Empírico del Coeficiente Alfa de Cronbach según Opciones de Respuesta, Muestra y Observaciones Atípicas. *Revista Iberoamericana de Diagnóstico y Evaluación – e Avaliação Psicológica*, *63*(2), 17. <https://doi.org/10.21865/RIDEP63.2.02>
- Ulpo Katherine, Espín Daniel, & Palmay Paúl. (2023). CO-PIRÓLISIS DE LA MEZCLA DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA Y RESIDUOS PLÁSTICOS. *Perfiles*, *29 Vol. 1*, 69–77. <https://doi.org/10.47187/perf.v1i29.207>
- Vizcaino Zúñiga, P. I., Cedeño Cedeño, R. J., & Maldonado Palacios, I. A. (2023). Metodología de la investigación científica: guía práctica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *7*(4), 9723–9762. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i4.7658](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7658)
- Wang, B., Yao, Z., Kumar, S., Salama Abdelhady Mohamed, M., Mohamed Abdel Sattar, A., Ortuño, N., Wang, X., & Qi, W. (2024). Pyrolysis conversion of multi-layer packaging waste under a CO<sub>2</sub> atmosphere: Thermo-kinetic study, evolved products analysis and artificial neural networks modeling. *Chemical Engineering Science*, *300*, 120584. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2024.120584>
- Wang, C., Li, Y., Wan, J., & Hu, Y. (2024). Analysis of CO<sub>2</sub> emissions reduction via by-product hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.138>
- Wang, Y., Yang, S., Bao, G., & Wang, H. (2024). Pyrolysis of macadamia nut peel using multicomponent Gaussian kinetic modeling and ANN analysis. *Biomass and Bioenergy*, *183*, 107170. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107170>

- Wei, Y., & Hadigheh, S. A. (2024). Enhancing carbon fibre recovery through optimised thermal recycling: Kinetic analysis and operational parameter investigation. *Materials Today Sustainability*, 25, 100661. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100661>
- Weiss, F., Machado, Ê. L., Rodriguez, A. de A. L., Lopez, D. A. R., & Strothmann, A. (2022a). Pirólise de passivo de aterro de resíduos industriais para geração de carvão. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 27(3), 523–531. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220200348>
- Weiss, F., Machado, Ê. L., Rodriguez, A. de A. L., Lopez, D. A. R., & Strothmann, A. (2022b). Pirólise de passivo de aterro de resíduos industriais para geração de carvão. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 27(3), 523–531. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220200348>
- Xu, H., Huang, L., Xu, M., Qi, M., Yi, T., Mo, Q., Zhao, H., Huang, C., Wang, S., & Liu, Y. (2020). Preparation and Properties of Cellulose-Based Films Regenerated from Waste Corrugated Cardboards Using [Amim]Cl/CaCl<sub>2</sub>. *ACS Omega*, 5(37), 23743–23754. [https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.0C02713/SUPPL\\_FILE/AO0C02713\\_SI\\_001.PDF](https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.0C02713/SUPPL_FILE/AO0C02713_SI_001.PDF)
- Yang, Y., Ma, Y., Yang, S., Yue, X., & Peng, W. (2020). Chemical components analysis of *Toona sinensis* bark and wood by pyrolysis–gas chromatography–mass spectrometry. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 15(S1). <https://doi.org/10.1002/apj.2487>
- Yek, P. N. Y., Chan, Y. H., Foong, S. Y., Mahari, W. A. W., Chen, X., Liew, R. K., Ma, N. L., Tsang, Y. F., Sonne, C., Cheng, Y. W., Tan, Y. H., & Lam, S. S. (2024). Co-processing plastics waste and biomass by pyrolysis–gasification: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(1), 171–188. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01654-7>
- Yue, L., Zhu, Y., Gao, L., Hu, C., Lai, S., & Zhao, X. (2020). Study on the Basic Physical Properties of Quinoline Insoluble Components from Coal Tar Pitch and Micro-structure of Its Derived Pitch Carbon | 煤沥青中喹啉不溶物的基础物性及喹啉不溶物基沥青炭的微观结构研究. *Cailiao Daobao/Materials Reports*, 34(4), 08077–08082. <https://doi.org/10.11896/cldb.19040079>
- Zhang, L., Wang, J., Ming, H., Hu, H., Dou, X., Xiao, Y., Cheng, L., & Hu, Z. (2024). Investigation of Cotton Stalk-Derived Hydrothermal Bio-Oil: Effects of Mineral Acid/Base and Oxide Additions. *Energies*, 17(19), 4854. <https://doi.org/10.3390/EN17194854/S1>
- Zhang, Y., Liang, Y., Li, S., Yuan, Y., Zhang, D., Wu, Y., Xie, H., Brindhadevi, K., Pugazhendhi, A., & Xia, C. (2023). A review of biomass pyrolysis gas: Forming mechanisms, influencing parameters, and product application upgrades. *Fuel*, 347, 128461. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.128461>
- Zhao, X., Zhu, G., Liu, J., Wang, J., Zhang, S., Wei, C., Cao, L., Zhao, S., & Zhang, S. (2024). Efficient Removal of Tetracycline from Water by One-Step Pyrolytic Porous Biochar Derived from Antibiotic Fermentation Residue. *Nanomaterials 2024*, Vol. 14, Page 1377, 14(17), 1377. <https://doi.org/10.3390/NANO14171377>
- Zhao, Y., Wang, Y., Xie, W., Li, Z., Zhou, Y., Qin, R., Wang, L., Zhou, J., & Ren, G. (2024). One-Step-Modified Biochar by Natural Anatase for Eco-Friendly Cr (VI) Removal.

Zuhara, S., Pradhan, S., & McKay, G. (2024). Pyrolysis of biosolids with waste cardboard: effect of operating parameters, feedstock size and blending ratio. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(1), 617–630. <https://doi.org/10.1007/S13762-023-04963-0/FIGURES/6>

# ANEXOS

## Anexo A. Cálculo de proceso analítico jerárquico (AHP).

MÉTODO	INSTRUMENTO	
Análisis serométrico	Análisis serométrico	2
	Paño de análisis	3
	Taca de calentamiento	4
	Equipo de laboratorio	6
	Micróscopio de laboratorio	6
Pincel	Herramienta	3
	Muestras de tinta	7
	Pólvora analítica	8
	Paño	9
	Pincel	10
Espectroscopia	Espectroscopia infrarroja (FTIR)	11
	Micróscopio electrónico	12
	Análisis de partículas	13
Distancia de rayos X	Difractómetro de rayos X	14
	Contorno de masa	15
Cromatografía	Cromatografía de gases (cromatograma de masa)	16
	Cromatografía	17
	PT-GC-MS	18
Análisis químico	Análisis de componentes volátiles	19
	Reactivos de análisis	20
	Modelado térmico y gravimétrico de base de datos	21
	Software de modelado químico	22
Gasificación	Sistema de SGA	23
	Tanques analíticos	24
Localización Infrarroja	FT-IR	25
	Caracterización	26

Método	Criterios					
	Equipo de laboratorio	Herramienta	Paño de análisis	Taca de calentamiento	Pincel	Reactivos
Equipo de laboratorio	1.00	3.00	5.00	7.00	1.00	3.00
Herramienta	0.33	1.00	3.00	3.00	1.00	3.00
Paño de análisis	0.20	0.33	1.00	2.00	1.00	3.00
Taca de calentamiento	0.14	0.33	0.33	1.00	1.00	3.00
Pincel	0.14	0.33	0.33	0.33	1.00	3.00
Reactivos	0.14	0.33	0.33	0.33	0.33	1.00
	2.34	5.40	11.32	16.67	10.67	24.30

Método	Peso Prioritario		Sumatoria		Ponderación
Equipo de laboratorio	0.0895	0.2054	0.4803	0.4803	0.2000
Herramienta	0.0333	0.1652	0.2945	0.198	0.2000
Paño de análisis	0.0200	0.0667	0.0900	0.195	0.2000
Taca de calentamiento	0.0139	0.0411	0.0450	0.195	0.2000
Pincel	0.0139	0.0411	0.0450	0.195	0.2000
Reactivos	0.0139	0.0411	0.0450	0.195	0.2000
	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Landa Max	7.9348
E	0.089025
EA	1.32
CR	0.075
Valor	ACEPTABLE

Método	Análisis serométrico	Criterios		
		Paño de análisis	Taca de calentamiento	Pincel
Análisis serométrico	1.00	1.00	3.00	
Paño de análisis	1.00	1.00	0.33	
Taca de calentamiento	0.33	0.33	1.00	
	2.33	5.00	4.33	

Método	Criterios	
	Espectro	Micróscopio electrónico
Espectro	1.00	1.00
Micróscopio electrónico	1.00	1.00
Análisis serométrico	1.00	0.33
	3.00	2.33

Método	Peso Prioritario		Sumatoria		Ponderación	
Análisis serométrico	0.4286	0.2000	0.6913	1.2000	0.4403	44.03%
Paño de análisis	0.4286	0.2000	0.0762	0.1652	0.2322	23.22%
Taca de calentamiento	0.1429	0.6000	0.2308	0.9796	0.3240	32.40%
	1	1	1	2	1	100.00%

Landa Max	3.0000001
E	0.304761205
EA	0.58
CR	0.525
Valor	ACEPTABLE

Landa Max	3.94541
E	0.074374
EA	0.58
CR	0.128
Valor	ACEPTABLE

	Método	Peso	Instrumento	Landa	CR	Peso Unitario	Peso Global %	Calificación
1	0.244498	0.244498	AT1	3.610	0.090	0.440	0.108	10.77%
2	0.244498		AT2			0.235	0.057	5.75%
3	0.244498		AT3			0.325	0.079	7.93%
4	0.24907	0.24907	PL1	7.594	0.075	0.444	0.111	11.06%
5	0.24907		PL2			0.200	0.050	4.93%
6	0.24907		PL3			0.134	0.033	3.33%
7	0.24907		PL4			0.074	0.018	1.85%
8	0.24907		PL5			0.074	0.018	1.85%
9	0.24907		PL6			0.044	0.011	1.11%
10	0.24907		PL7			0.029	0.007	0.72%
11	0.09571	0.09571	ES1	3.148	0.090	0.048	0.005	0.46%
12	0.09571		ES2			0.238	0.023	2.28%
13	0.09571		ES3			0.286	0.027	2.73%
14	0.053923	0.053923	CG1	4.156	0.058	0.388	0.021	2.09%
15	0.053923		CG2			0.304	0.016	1.64%
16	0.053923		CG3			0.179	0.010	0.97%
17	0.053923		CG4			0.129	0.007	0.70%
18	0.22023	0.22023	AC1	4.177	0.065	0.558	0.123	12.29%
19	0.22023		AC2			0.263	0.058	5.80%
20	0.22023		AC3			0.122	0.027	2.68%
21	0.22023		AC4			0.057	0.013	1.25%
22	0.039324	0.039324	GS1	0.571	0.000	0.048	0.002	0.19%
23	0.039324		GS2			0.238	0.009	0.94%
24	0.020475	0.020475	LH1	0.659	0	0.226	0.005	0.46%
25	0.020475		LH2			0.060	0.001	0.12%

## Anexo B.

Instrumento de recolección de datos.

Instrumentos: Cuestionario de Reciclaje de residuos industriales						
Dimensiones/Indicadores/ Ítems			SI	NO	A veces	
<b>Dimensión 1: Conocimiento sobre el reciclaje de residuos</b>						
<b>Indicador 1: Conocimiento de las técnicas de reciclaje</b>						
1	¿Conoce las técnicas de reciclaje que se utilizan en la empresa para el tratamiento de los residuos de cartón y papel?					
2	¿Está informado/a sobre la cantidad de residuos de cartón y papel que se reciclan actualmente en la empresa?					
<b>Indicador 2: Conocimiento del destino de los residuos</b>						
3	¿Tiene conocimiento sobre el destino final de los residuos que no son reciclados?					
4	¿Tiene información sobre los beneficios ambientales del reciclaje de residuos de la empresa?					
<b>Dimensión 2: Procedimientos de reciclaje y su eficiencia</b>						
<b>Indicador 3: Eficiencia del proceso de reciclaje</b>						
5	¿Cree que el proceso actual de reciclaje de residuos industriales de la empresa es eficiente?					
6	¿El sistema de reciclaje actual permite un aprovechamiento máximo de los residuos generados en la empresa?					
<b>Indicador 4: Ajuste a normativas y control de calidad</b>						
7	¿El proceso de reciclaje en la empresa se ajusta a las normativas ambientales vigentes?					
8	¿Se realiza un control de calidad sobre el material reciclado para asegurar su reutilización en otros procesos?					
<b>Dimensión 3: Impacto ambiental del reciclaje</b>						
<b>Indicador 5: Reducción del impacto ambiental</b>						
9	¿Considera que el reciclaje de los residuos de la empresa contribuye a disminuir el impacto ambiental en la comunidad?					
10	¿Cree que la gestión adecuada de los residuos reciclados reduce la generación de desechos en vertederos?					
<b>Indicador 6: Reducción de la huella de carbono</b>						
11	¿Cree que el reciclaje de residuos contribuye a la reducción de la huella de carbono de la empresa?					
12	¿Considera que el reciclaje de lodos residuales ayuda a preservar los recursos naturales?					
<b>Dimensión 4: Aplicación del método pirolítico</b>						
<b>Indicador 7: Mejora de la eficiencia con pirólisis</b>						
13	¿Cree que la implementación de un método pirolítico podría mejorar la eficiencia del reciclaje de lodos residuales en la empresa?					
14	¿Cree que la pirólisis podría transformar de manera eficiente los lodos residuales en productos reutilizables?					
<b>Indicador 8: Ahorro de recursos y costos</b>						
15	¿Considera que el uso de pirólisis podría generar un ahorro de energía en el tratamiento de los residuos industriales?					
16	¿Cree que la pirólisis podría reducir los costos de disposición final de los lodos residuales?					
<b>Dimensión 5: Percepción del método pirolítico</b>						
<b>Indicador 9: Aceptación de la tecnología pirolítica</b>						
17	¿Está de acuerdo con la idea de invertir en tecnologías como la pirólisis para tratar los residuos de cartón y papel?					
18	¿Está de acuerdo en que la pirólisis podría ser una solución más sostenible para el manejo de residuos industriales en la empresa?					
<b>Indicador 10: Capacitación y percepción pública</b>						
19	¿Cree que la implementación del método pirolítico requiere una capacitación especializada para los empleados de la empresa?					
20	¿Considera que la pirólisis podría mejorar la percepción pública de la empresa en términos de sostenibilidad y responsabilidad ambiental?					
21	¿Cree que la implementación del método pirolítico en la empresa mejoraría su competitividad en el mercado por su enfoque en tecnologías limpias?					

## Anexo C.

Validación de instrumento por criterio de juicio de expertos.

MATRIZ DE VALIDACIÓN POR CRITERIO DE JUICIO DE EXPERTOS																	
INSTRUMENTO DE VARIABLE DEPENDIENTE: RECICLAJE DE RESIDUOS INDUSTRIALES																	
VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADORES	N°	ÍTEMS	ESCALA			CRITERIOS DE EVALUACIÓN								Observación y/o recomendación	
					1. SI	2. No	3. A veces	Relación entre la variable y la dimensión		Relación entre la dimensión y el indicador		Relación entre el indicador y el ítem		Relación entre el ítem y la opción de respuesta			
								SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO		
Reciclaje de residuos industriales	Conocimiento sobre el reciclaje de residuos	Conocimiento de las técnicas de reciclaje	1	¿La alta dirección asegura que los objetivos de calidad son coherentes con la estrategia organizacional?				X		X							
			2	¿Se evidencian responsabilidades claras respecto al liderazgo en calidad?													
		Conocimiento del destino de los residuos	3	¿Se gestionan adecuadamente las quejas y retroalimentación de los clientes?					X								
			4	¿La empresa mide y monitorea la satisfacción del cliente regularmente?													
	Procedimientos de reciclaje y su eficiencia	Eficiencia del proceso de reciclaje	5	¿La comunicación interna sobre la calidad es clara y eficaz?				X		X							
			6	¿El personal comprende su rol y responsabilidad en el sistema de gestión de calidad?													
		Ajuste a normativas y control de calidad	7	¿La organización identifica riesgos y oportunidades en los procesos que afectan la calidad?					X								
			8	¿Las acciones preventivas se documentan y gestionan de manera sistemática?													
	Impacto ambiental del reciclaje	Reducción del impacto ambiental	9	¿Los cambios se implementan sin afectar negativamente la calidad del producto?				X		X							
			10	¿Existen planes de contingencia para gestionar cambios imprevistos?													
		Reducción de la huella de carbono	11	¿Los objetivos de calidad están alineados con las estrategias de la organización?					X								
			12	¿Existen procedimientos documentados y estandarizados para cada proceso clave?													
	Aplicación del método pirolítico	Mejora de la eficiencia con pirolisis	13	¿Se aplican acciones correctivas cuando los resultados del proceso no cumplen con los estándares?				X		X							
			14	¿Se seleccionan proveedores en base a criterios de calidad definidos?													
		Ahorro de recursos y costos	15	¿Se realiza un control adecuado de los materiales comprados para asegurar su calidad?					X								
			16	¿Existe un procedimiento documentado para identificar y gestionar productos no conformes?													
	Percepción del método pirolítico	Aceptación de la tecnología pirolítica	17	¿Los productos no conformes se separan y gestionan antes de llegar al cliente?				X		X							
			18	¿Los productos son trazables desde la recepción de la materia prima hasta la entrega final?													
		Capacitación y percepción pública	19	¿Se investiga la causa raíz de las no conformidades de manera sistemática?					X								
			20	¿Las acciones correctivas y preventivas se documentan y se verifica su eficacia?													
			21	¿Se realizan revisiones periódicas del sistema de gestión de calidad?													

### Validación de instrumento por Experto 1

**Nombre de instrumento:** DISEÑO DE UN MÉTODO PIROLÍTICO PARA RECICLAR RESIDUOS INDUSTRIALES COMO FUENTE DE ENERGÍA, EMPRESA CARTONERA ORENSE, ECUADOR

**Objetivo:** Diseñar un método pirolítico para reciclar los residuos industriales con el fin de reducir los desechos y aprovecharlos como fuente de energía en una Empresa Cartonera Orense.

**Dirigido a:** Trabajadores de la Empresa Cartonera Orense.

**Apellidos y nombres del evaluador:** Veliz Aguayo Alejandro Crisostomo

**Grado académico del experto evaluador:** Ingeniero Mecánico  
MSc. En ingeniería mecánica  
PhD. En ciencias de la ingeniería

**Áreas de experiencia profesional:** Profesional (x) Educativa (x)

**Institucion dónde labora:** Universidad Estatal Península de Santa Elena

**Tiempo de experiencia profesional en el área:** 30 años

**Valoración:**

Bueno	Regular	Malo
x		

La Libertad, 31 de Octubre del 2024



Ing. Alejandro C. Veliz Aguayo PhD.  
C.I: 090818228-0  
Experto 1

### Validación de instrumento por Experto 2

**Nombre de instrumento:** DISEÑO DE UN MÉTODO PIROLÍTICO PARA RECICLAR RESIDUOS INDUSTRIALES COMO FUENTE DE ENERGÍA, EMPRESA CARTONERA ORENSE, ECUADOR.

**Objetivo:** Diseñar un método pirolítico para reciclar los residuos industriales con el fin de reducir los desechos y aprovecharlos como fuente de energía en una Empresa Cartonera Orense.

**Dirigido a:** Trabajadores de la Empresa Cartonera Orense.

**Apellidos y nombres del evaluador:** Sosa Bueno Graciela Celedonia

**Grado académico del experto evaluador:**  
Ingeniera Industrial.  
Master en Sistemas Integrados de Gestión  
Doctora en Educación  
PhD en Docencia, Investigación y Gestión en Educación Superior.

**Áreas de experiencia profesional:** Profesional (41) Educativa (30)

**Institución dónde labora:** Universidad Estatal Península de Santa Elena

**Tiempo de experiencia profesional en el área:** 41 años

**Valoración:**

Bueno	Regular	Malo
x		

La Libertad, 31 de Octubre del 2024



Dra. Graciela Celedonia Sosa Bueno, PhD.

C.I: 0907694186

Experto 2

### Validación de Instrumento por Experto 3

**Nombre de instrumento:** DISEÑO DE UN METODO PIROLITICO PARA RECICLAR RESIDUOS INDUSTRIALES COMO FUENTE DE ENERGIA, EMPRESA CARTONERA ORENSE, ECUADOR

**Objetivo:** Diseñar un método pirolítico para reciclar los residuos industriales con el fin de reducir los desechos y aprovecharlos como fuente de energía en una Empresa Cartonera Orense.

**Dirigido a:** Trabajadores de la Empresa Cartonera Orense.

**Apellidos y nombres del evaluador:** Herrera Brunett Gerardo Antonio

**Grado académico del experto evaluador:** Ingeniero Industrial.  
Magister en Seguridad, Higiene Industrial y Salud Ocupacional .  
Doctor en Ciencias ambientales.

**Áreas de experiencia profesional:** Profesional (x) Educativa (x)

**Institucion dónde labora:** Universidad Estatal Peninsula de Santa Elena

**Tiempo de experiencia profesional en el área:** 35 años

**Valoración:**

Bueno	Regular	Malo
x		

La Libertad, 31 de Octubre del 2024

Ing. Gerardo Herrera Brunett, Ph D  
C.I: 0909254260  
Experto 3

#### Validación de instrumento por Experto 4

**Nombre de instrumento:** DISEÑO DE UN MÉTODO PIROLÍTICO PARA RECICLAR RESIDUOS INDUSTRIALES COMO FUENTE DE ENERGÍA, EMPRESA CARTONERA ORENSE, ECUADOR

**Objetivo:** Diseñar un método pirolítico para reciclar los residuos industriales con el fin de reducir los desechos y aprovecharlos como fuente de energía en una Empresa Cartonera Orense.

**Dirigido a:** Trabajadores de la Empresa Cartonera Orense.

**Apellidos y nombres del evaluador:** Román Ordóñez Freddy Patricio

**Grado académico del experto evaluador:** Ingeniero Industrial  
MSc. Seguridad y Salud Ocupacional

**Áreas de experiencia profesional:** Profesional (x) Educativa ( )

**Institución dónde labora:** EMPRESA CARTONERA ORENSE

**Tiempo de experiencia profesional en el área:** 12 años

**Valoración:**

Bueno	Regular	Malo
x		



Freddy Roman  
Jueves, 07/11/2024, 13:45

Machala, 1 de Noviembre de 2024

Ing. Román Ordóñez Freddy, MSc.  
C.I: 0704922194  
Experto 4

**Validación de instrumento por Experto 5**

**Nombre de instrumento:** DISEÑO DE UN MÉTODO PIROLÍTICO PARA RECICLAR RESIDUOS INDUSTRIALES COMO FUENTE DE ENERGÍA, EMPRESA CARTONERA ORENSE, ECUADOR

**Objetivo:** Diseñar un método pirolítico para reciclar los residuos industriales con el fin de reducir los desechos y aprovecharlos como fuente de energía en una Empresa Cartonera Orense.

**Dirigido a:** Trabajadores de la Empresa Cartonera Orense.

**Apellidos y nombres del evaluador:** Salvatierra Barzola Miguel Antonio

**Grado académico del experto evaluador:** Ingeniero Mecánico  
MSc. Ciencias de la Ingeniería

**Áreas de experiencia profesional:** Profesional (x) Educativa (x)

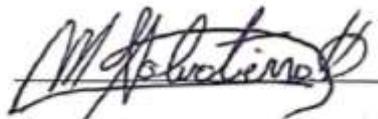
**Institución dónde labora:** Universidad Estatal Península de Santa Elena

**Tiempo de experiencia profesional en el área:** 30 años

**Valoración:**

Bueno	Regular	Malo
x		

Santa Elena, 1 de Noviembre de 2024



Ing. Salvatierra Barzola Miguel, MSc  
C.I. 0907013718  
Experto 5

## Anexo D.

### Recopilación de datos en SPSS 25 y Google Forms.

**Escala: ALL VARIABLES**

**Resumen de procesamiento de casos**

	ni	%
Casos Válidos <sup>a</sup>	20	100,0
Excluidos <sup>b</sup>	0	0
<b>Total</b>	<b>20</b>	<b>100,0</b>

a. La eliminación por lista se basa en todos los variables del procesamiento.

**Estadísticas de fiabilidad**

Alfa de Cronbach	Si se eliminan elementos
.820	.71

**Estadísticas de elemento**

	Media	Desv. Estándar	N
¿La idea de crear un grupo que los alumnos de control con software con estrategia organizacional?	1,53	,366	20
¿Se valoraría implementar estas ideas?	1,43	,321	20

**Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra**

		D1	D2	D3	D4	D5
N		20	20	20	20	20
Parámetros teóricos**	Media	5,4000	5,8000	6,4000	6,7000	6,9000
	Desv. Estándar	2,01668	2,00000	2,07254	1,75816	1,74710
Máximo diferencial absoluto	Absoluto	,387	,283	,199	,184	,216
	Positivo	,387	,283	,199	,184	,216
Estadístico de prueba	Negativo	-,243	-,195	-,191	-,195	-,194
		,387	,283	,199	,184	,216
Sig. asintótica bilateral		,800 <sup>a</sup>	,901 <sup>a</sup>	,937 <sup>a</sup>	,912 <sup>a</sup>	,918 <sup>a</sup>

a. La distribución de prueba es normal.  
b. Se calculó a partir de datos.  
c. Consecuencia de significancia de Lilliefors.

**SWA TESTE**  
/RS-> (NORMAL)=D1  
/MESSING=ANALYSIS.

**Pruebas NPar**

**Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra**

	D1
N	20

Timestamp	1. ¿Conoce las técnicas de redacción que se le da?	2. ¿Está informado/a sobre la cantidad de redacción?	3. ¿Tiene conocimiento sobre el destino final?	4. ¿Tiene información sobre los beneficios?
10/10/2024 21:46:57	No estoy seguro	SI	SI	SI
10/10/2024 21:47:40	SI	SI	SI	SI
10/10/2024 21:49:14	No	No	No estoy seguro	No
10/10/2024 21:50:44	SI	SI	SI	No estoy seguro
10/10/2024 21:53:20	No	No	No estoy seguro	SI
10/10/2024 21:54:50	SI	No	No	No
10/10/2024 21:55:15	No estoy seguro	No estoy seguro	No estoy seguro	No estoy seguro
10/10/2024 21:59:18	SI	SI	SI	SI
10/10/2024 21:57:47	No	No	SI	No estoy seguro
10/10/2024 21:59:41	No estoy seguro	No	SI	No estoy seguro
10/10/2024 22:29:51	No	No	SI	SI
10/10/2024 22:31:15	SI	No estoy seguro	No estoy seguro	SI

**Anexo E.**

*Modelo de proceso de pirólisis - Beston Group.*



**Anexo F.**

*Proceso de tratamiento de lodos cartoneros en empresa.*



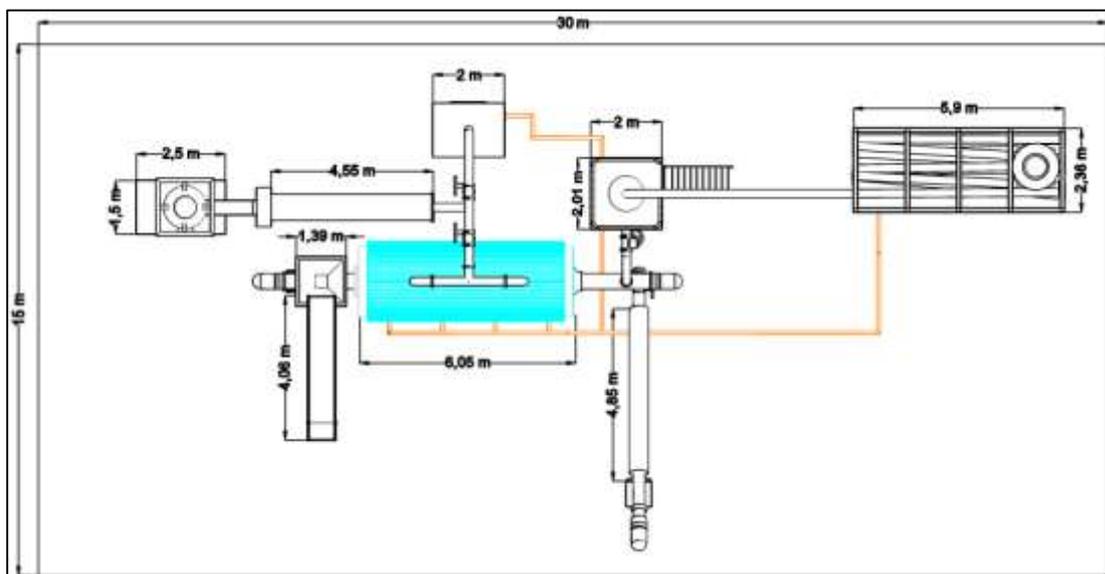


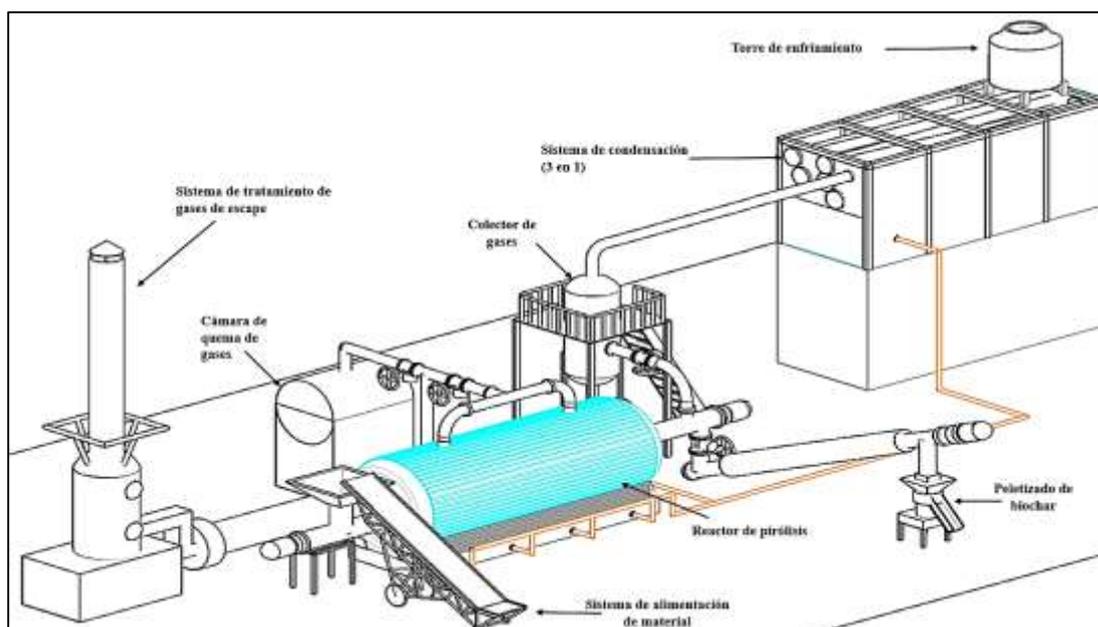
**Anexo G.**  
*Depósito de residuos cartoneros tratados.*





**Anexo H.**  
*Plano de medidas de proceso pirolítico.*





**Anexo I.**  
*Análisis proximal y termogravimétrico (TGA).*

Curve Name:									
OT-077, 07.11.2024					1	7:10:42			
Performed 07.11.20					24	17:10:42			
Curve Values:									
Index	t	Ts	Tr	Value					
	[s]	[°C]	[°C]	[mg]	Humedad	M volátil	C. fijo	Cenizas	
0	0	25	25	26.806	67.4%	14.5%	3.8%	14.2%	
53	53	42.6667	42.6667	26.72					
106	106	60.3333	60.3333	26.0766					
159	159	78	78	24.556					
212	212	95.6667	95.6667	22.222					
265	265	100	100	19.8535					
318	318	100	100	17.7426					
371	371	100	100	15.8508					
424	424	100	100	14.2659					
477	477	100	100	12.8822					
530	530	100	100	11.6516					
583	583	100	100	10.5626					
636	636	100	100	9.68514					
689	689	100	100	9.26835					
742	742	100	100	9.12154					
795	795	100	100	9.0465					
848	848	100	100	9.005					
901	901	100	100	8.953					
954	954	100	100	8.9211					



INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO

1. Información general

Orden de trabajo N°: **077** N° Informe: **077**  
Ref. Proforma: **AI-2024- 077**

Razón Social / Nombres Apellidos:	Bryan Salvatierra	Muestra tomada por:	Cliente
RUC ó CI:	0750622722		
Dirección:	Santa Rosa, Calle Jose Maria Otague, entre Jose Joaquin de Omedo y Sucre, 32B, El Oro		
Fecha de emisión:	30 de octubre de 2024		
Fecha de muestreo:	N/A	05/11/2024	
Fecha de recepción de la muestra:		07/11/2024	
Fecha de realización del análisis:			
Correo electrónico:	bryan.salvatierra00@gmail.com		
Teléfono:	+593 98 569 3941		
Persona de Contacto:	Bryan Salvatierra	Teléfono:	+593 98 569 3941

2. Especificaciones del ensayo

Muestra:	Lodo de cartonera		
N° muestras	1		
Descripción de la muestra:	Lodo de cartonera		
Características de la muestra:	M1		colvide de color negro
Equipo:	Análisis Termogravimetrico (TGA)		
Lugar:	Laboratorio A-210		
Analista:	Dra. Jenny Munillo		
Observaciones:			

3. Resultados

Parámetro	Unidad	Lodo cartonera
Humedad	%	67,4
Carbono volátil	%	14,5
Carbono fijo	%	3,8
Cenizas	%	14,2

Los resultados documentales de respaldo se envían al correo electrónico del cliente.

Ing. Pablo Londoño  
Responsable técnico

El informe no se puede reproducir de manera total o parcial sin la autorización del laboratorio.  
Descargo de responsabilidad por muestreo o información entregada por el cliente

FIN DEL INFORME

## Anexo J.

Ficha técnica de planta de pirólisis.

### PLANTA DE PIRÓLISIS

**Fabricante: Beston Group**

**Precio de planta = \$58000**



Característica	Descripción
<b>Modelo</b>	BLJ-6
<b>Capacidad de procesamiento</b>	4-6 toneladas por día
<b>Proceso de trabajo</b>	Intermitente
<b>Tamaño del reactor</b>	Ø2200*6000 mm
<b>Material del reactor</b>	Q345R
<b>Sistema de manejo</b>	400 reductor + motor de accionamiento de 5.5 kW
<b>Terreno (LWH)</b>	30m x 12m x 8m
<b>Fuerza</b>	37.85 kW
<b>Quemador</b>	2*300,000 kcal
<b>Peso total de los materiales</b>	Sobre 24.5 toneladas
<b>Número de contenedores</b>	140FR + 140HQ + 1*20 GP
<b>Ruido (dB)</b>	≤60
<b>Materiales de calefacción</b>	Combustóleo, gas natural, GLP, diesel, etc.
<b>Sistema de condensación</b>	Condensador vertical Ø630*3600, área de condensación de una sola pieza 17.8 m <sup>2</sup>
<b>Condensador 3 en 1</b>	580022602500, área de condensación 35.85 m <sup>2</sup>