

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA PETROQUÍMICA



TESIS

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL PROCESO DE PIROLISIS
DE BIOSÓLIDOS GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES DE SAN JERONIMO, CUSCO**

PRESENTADO POR:

Br. LIZ MARINA ZAMALLOA DELGADO
Br. SHIOMARA KIMBERLY GUTIERREZ
SURCO

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO PETROQUÍMICO**

ASESOR:

MSC. URIEL RAUL FERNANDEZ BERNAOLA

CUSCO – PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Uriel Raul Fernandez Bernola
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada:

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL PROCESO DE
PIROLISIS DE BIOSÓLIDOS GENERADOS EN LA PLANTA
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE SAN JERONIMO,
CUSCO

Presentado por: Liz Marina Zamaño Delgado DNIN° 72893319

presentado por: Shiomara Kimberly Gutierrez Surco DNIN°: 76528789

Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO PETROQUÍMICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del *Reglamento para Uso del Sistema Detección de*
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 7 %.

**Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a
grado académico o título profesional, tesis**

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 16 de Julio de 2026

Firma

Post firma Uriel Raul Fernandez Bernola

Nro. de DNI 43130855

ORCID del Asesor http://orcid.org/0000-0002-9386-702X

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: old: 27259:608257247

Gutierrez Surco - Zamalloa Delgado

TESIS Gutierrez - Zamalloa (8) (2).pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trnoid::27259:608257247

151 páginas

Fecha de entrega

16 jul 2026, 11:43 a.m. GMT-5

32.457 palabras

194.526 caracteres

Fecha de descarga

16 jul 2026, 11:48 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS Gutierrez - Zamalloa (8) (2).pdf

Tamaño del archivo

6.1 MB

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Exclusiones

- ▶ N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 6%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

PRESENTACIÓN

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería de Procesos:

En cumplimiento con lo establecido en el Reglamento de Grados y Títulos vigente de nuestra Facultad, tenemos el honor de presentar la tesis intitulada: **“EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE BIOSÓLIDOS GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES DE SAN JERÓNIMO, CUSCO”**, con la finalidad de optar al título Profesional de Ingeniero Petroquímico.

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo de investigación primero a Dios que me dio las fuerzas necesarias para concluirlo, a mis padres Heber Zamalloa y Marcia Delgado por el apoyo incondicional que me han brindado todo este tiempo, a mis hermanos Marcelo, Salvador, Luisa, Jesús y Vania porque nunca dejaron de creer en mí.

Liz Marina Zamalloa Delgado

En primer lugar, dedico este trabajo a Dios, por ser mi guía, mi fortaleza y mi refugio en cada momento de este camino. A mis padres Uriel Gutierrez y Roxana Surco quienes con su amor incondicional, apoyo y esfuerzo han sido un pilar fundamental en cada etapa de mi vida. Gracias por creer en mí y por enseñarme a nunca rendirme ante los desafíos.

A mis hermanos, Lenin y Milagros Gutierrez, por su compañía, comprensión y siempre brindarme su apoyo en los momentos más importantes de mi vida.

A mi tía Emperatriz Surco, por su cariño y brindarme su apoyo durante todo este proceso.

A mi novio Juan Víctor Jara, por su amor, apoyo y comprensión. Gracias por tus palabras de aliento y por creer en mí, tu apoyo ha sido fundamental para alcanzar este sueño.

Shiomara Kimberly Gutierrez Surco

AGRADECIMIENTOS

Mis gracias infinitas a Dios por darme la oportunidad de hacer esta meta realidad, a mis padres y hermanos por su paciencia y comprensión para conmigo. A mi asesor, Uriel Fernández, y a mi coasesor, Williams Ramos por ser de guía para nosotras y su apoyo constante en todo el proceso de la presente tesis, por enseñarnos a amar nuestra carrera y ser de ejemplo para futuros ingenieros. Extiendo mi gratitud al personal del Laboratorio de Normalización de Petróleo y Derivados, y al grupo de Procesos Termoquímicos de la Universidad Nacional de Ingeniería, por su buena voluntad, colaboración y conocimientos compartidos. A mi compañera de tesis Kimberly y su apreciada mamá por su ferviente apoyo en este trabajo. Agradezco a mi mejor amigo Josías por su apoyo en cada momento difícil, a todos mis hermanos en Cristo que nunca dejaron de animarme y aconsejarme en todo este proceso y a todos mis amigos que han estado conmigo compartiendo momentos especiales durante mi formación universitaria.

Liz Marina Zamalloa Delgado

A Dios por su amor infinito y darme la oportunidad de culminar esta importante etapa en mi vida profesional, a mis padres y hermanos por su apoyo incondicional y nunca dejarme sola en este proceso.

A mi asesor de tesis, Uriel Fernández y a mi coasesor Williams Ramos, por su apoyo desinteresado y ser una guía constante en este proceso. Sus experiencias, conocimientos y recomendaciones fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de esta investigación. También quisiera hacer un agradecimiento especial a todo el equipo del Laboratorio de Normalización de Petróleo y Derivados y procesos termoquímicos.

A mi compañera de tesis, Liz Zamalloa y su querida mamá por su paciencia y apoyo incondicional, agradezco a mi querida familia y amigos por siempre darme ánimos y sentirse orgullosos de mí.

Finalmente agradezco a todas las personas que han contribuido y han sido parte esencial de este logro.

Shiomara Kimberly Gutierrez Surco

INDICE GENERAL

PRESENTACIÓN	II
DEDICATORIAS	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
INDICE GENERAL	V
INDICE DE TABLAS.....	VIII
INDICE DE FIGURAS	IX
LISTADO DE ABREVIATURAS.....	XI
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
CAPITULO I: GENERALIDADES.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2.1. Descripción del problema	2
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	4
1.3.1. Problema General	4
1.3.2. Problemas Específicos	5
1.4. OBJETIVOS	5
1.4.1. Objetivo General.....	5
1.4.2. Objetivos Específicos	5
1.5. JUSTIFICACIÓN	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	7
2.2. BASES TEÓRICAS.....	17
2.2.1. Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de San Jerónimo	17
2.2.2. Lodos de aguas residuales	17
2.2.3. Clasificación del uso de lodos	17
2.2.4. Tipos de lodos generados según el grado de tratamiento de aguas residuales	18
2.2.5. Tipos de Lodos según Nivel de aprovechamiento	19
2.2.6. Mecanismos para el manejo y operación de lodos de la PTAR de San Jerónimo-Cusco ...	21
2.2.7. Biosólidos.....	22
2.2.8. Tipos de biosólidos.....	23
2.2.9. Aprovechamiento de los biosólidos.....	24
2.2.10. Características de los biosólidos	25

2.2.11.	Alternativas de manejo de biosólidos	26
2.2.12.	Proceso de Pirólisis en Biosólidos	27
2.2.13.	Tipos de pirólisis.....	29
2.2.14.	Tipos de Reactores de Pirólisis	37
2.2.15.	Rendimiento de la materia de biosólidos	37
2.3.	MARCO CONCEPTUAL	38
2.3.1.	Temperatura (°C).....	38
2.3.2.	Tamaño de partícula (mm).....	38
2.3.3.	Rendimiento de productos líquidos	38
2.3.4.	Características fisicoquímicas de productos líquidos	39
2.4.	ENFOQUE, TIPO Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	40
2.5.	HIPÓTESIS	41
2.5.1.	Hipótesis General	41
2.5.2.	Hipótesis Específica	41
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS.....		41
3.1.	POBLACIÓN Y MUESTRA	41
3.1.1.	Población de investigación	41
3.1.2.	Tamaño de muestra.....	42
3.2.	MATERIALES, REACTIVOS, EQUIPOS E INSTRUMENTOS	42
3.3.	ÁMBITO ESPACIAL.....	43
3.4.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	43
3.5.	VARIABLES Y MATRIZ DE PARALIZACIÓN DE VARIABLES	47
3.5.1.	Variables Independientes.....	47
3.5.2.	Variables Dependientes	47
3.5.3.	Variable Interviniente	47
3.6.	MÉTODOS.....	49
3.6.1.	Procedimientos	49
3.6.2.	Procedimiento experimental (Técnicas e instrumentos para la colecta de datos e instrumentos de medición).....	52
3.6.3.	Métodos de análisis de datos	64
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES		65
3.7.	RESULTADOS.....	65
3.7.1.	Caracterización de la materia prima (Biosólidos).....	65
3.7.2.	Discusión acerca de la caracterización de la materia prima.....	73
3.7.3.	Determinación del rendimiento de los productos líquidos.....	77
3.7.4.	Discusión acerca del rendimiento de los productos obtenidos mediante pirólisis	79
3.7.5.	Análisis estadístico	86
3.7.6.	Caracterización del producto líquido obtenido por pirólisis	92
3.7.7.	Discusión acerca de la caracterización del producto líquido	97

CONCLUSIONES.....	105
RECOMENDACIONES	106
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	107
APENDICE	116
ANEXOS.....	124

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 CARACTERIZACIÓN DE LODOS GENERADOS EN PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	19
TABLA 2 CONCENTRACIÓN DE METALES Y TASAS DE CARGA SEGÚN LA REGULACIÓN 503 DE LA EPA	20
TABLA 3 LÍMITE DE CALIDAD MICROBIOLÓGICA DE LODOS	21
TABLA 4 DIFERENCIA EN LA COMPOSICIÓN DE UN LODO CRUDO Y UN BIOSÓLIDO	23
TABLA 5 APROVECHAMIENTO DE BIOSÓLIDOS	24
TABLA 6 TIPOS DE PIROLISIS	30
TABLA 7 <i>RENDIMIENTO DE PRODUCTOS LÍQUIDOS OBTENIDOS EN DIFERENTES REACTORES DE PIROLISIS DE BIOSÓLIDOS</i>	32
TABLA 8 NUMERO DE EXPERIMENTOS Y REPETICIONES	45
TABLA 9 ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) DE UN FACTOR PARA EL RENDIMIENTO DEL PRODUCTO LIQUIDO	46
TABLA 10 MATRIZ DE OPERALIZACIÓN DE VARIABLES	48
TABLA 11 BALANCE DE ENTRADA Y SALIDA EN EL PRETRATAMIENTO DE BIOSÓLIDOS.....	66
TABLA 12 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LOS BIOSÓLIDOS.....	68
TABLA 13 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO ANTES DEL PRETRATAMIENTO DE BIOSÓLIDOS	72
TABLA 14 ANÁLISIS BACTERIANO DE LOS BIOSÓLIDOS	72
TABLA 15 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DESPUÉS DEL PRETRATAMIENTO DE BIOSÓLIDOS	73
TABLA 16 COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LA MATERIA PRIMA.....	74
TABLA 17 RENDIMIENTO DE LOS PRODUCTOS DE PIROLISIS (%M/M)	78
TABLA 18 RENDIMIENTO PROMEDIO DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS MEDIANTE PIROLISIS DE BIOSÓLIDOS (%M/M)	78
TABLA 19 COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS Y RESULTADOS PARA LA PIROLISIS TÉRMICA.....	84
TABLA 20 PRUEBA ANOVA DIFERENCIA DE PRODUCCIÓN DE LÍQUIDOS SEGÚN TEMPERATURA USADA.	86
TABLA 21 PRUEBA TUKEY DIFERENCIA DE MEDIAS A PARES PRODUCCIÓN DE LÍQUIDOS	86
TABLA 22 PRUEBA ANOVA DIFERENCIA EN LA CONSERVACIÓN DE SOLIDOS SEGÚN TEMPERATURA USADA	88
TABLA 23 PRUEBA TUKEY DIFERENCIA DE MEDIAS A PARES.....	89
TABLA 24 PRUEBA ANOVA DIFERENCIA EN LA GENERACIÓN DE GASES SEGÚN TEMPERATURA USADA.....	90
TABLA 25 PRUEBA TUKEY DIFERENCIA DE MEDIAS A PARES.....	91
TABLA 26 PROPIEDADES FÍSICAS DEL PRODUCTO LÍQUIDO OBTENIDOS MEDIANTE LABORATORIO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA PIROLISIS DE BIOSÓLIDOS	93
TABLA 27 RESULTADOS DEL ENSAYO DE DESTILACIÓN ASTM D86 DEL BIOACEITE OBTENIDO, GASOLINA REGULAR Y DIÉSEL 2	95
TABLA 28 ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS UTILIZANDO LAS CURVAS DE DESTILACIÓN DE LA ASTM D86 EN EL SOFTWARE DWSIM	96
TABLA 29 COMPARACIÓN DE LA DENSIDAD OBTENIDA EN EL LABORATORIO Y ESTIMADA EN EL SOFTWARE DWSIM	97
TABLA 30 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL PRODUCTO LÍQUIDO OBTENIDO CON LAS PROPIEDADES DE LOS PRODUCTOS LÍQUIDOS (BIOACEITES) OBTENIDOS DE DIFERENTES BIOMASAS.....	98

TABLA 31 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES DEL PRODUCTO LÍQUIDO CON INVESTIGACIONES REALIZADAS	100
TABLA 32 <i>MATRIZ DE CONSISTENCIA PARA LA EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE BIOSÓLIDOS GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES DE SAN JERÓNIMO, CUSCO</i>	116
TABLA 33 DATOS OBTENIDOS MEDIANTE EL SOFTWARE “LOGGER PRO” CON RESPECTO AL REACTOR.....	118
TABLA 34 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DE LOS LODOS RESIDUALES DE UNA PTAR	124

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 MANEJO Y OPERACIÓN DE LODOS DE LA PTAR DE SAN JERÓNIMO, CUSCO	22
FIGURA 2 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO DE LODOS DE DEPURADORA.....	28
FIGURA 3 ANÁLISIS FTIR DE LOS LÍQUIDOS DE PIRÓLISIS	35
FIGURA 4 REACTOR DE SEMIBATCH.....	37
FIGURA 5 DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA PIRÓLISIS DE BIOSÓLIDOS	49
FIGURA 6 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PIRÓLISIS DE BIOSÓLIDOS	51
FIGURA 7 MUESTRA DE BIOSÓLIDOS HÚMEDOS RECOLECTADOS DE LA PTAR.....	52
FIGURA 8 DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO	55
FIGURA 9 <i>DIAGRAMA P&ID DEL PROCESO DE PIRÓLISIS</i>	56
FIGURA 10 ESQUEMA DEL SISTEMA EXPERIMENTAL PARA LA PIRÓLISIS DE BIOSÓLIDOS	58
FIGURA 11 ALMACENAMIENTO DE PRODUCTOS LÍQUIDOS.....	59
FIGURA 12 BAÑO ISOTÉRMICO ACOPLADO A UN VISCOSÍMETRO CAPILAR.....	59
FIGURA 13 MANTA CALEFACTORA Y EQUIPO DE DESTILACIÓN	60
FIGURA 14 ANÁLISIS DE PODER CALORÍFICO “ASTM D240”	61
FIGURA 15 PERA DE DECANTACIÓN.....	62
FIGURA 16 EQUIPO DE MEDICIÓN DEL PUNTO DE INFLAMACIÓN PENSKEY-MARTENS.....	63
FIGURA 17 EQUIPO DE MEDICIÓN DE PUNTO DE FLUIDEZ.....	63
FIGURA 18 BALANCE DE MATERIA DEL PROCESO DE PRETRATAMIENTO DE BIOSÓLIDOS.....	65
FIGURA 19 CURVA DEL ANÁLISIS PRÓXIMO TGA PARA DETERMINACIÓN DE CENIZAS Y CARBÓN	70
FIGURA 20 COMPORTAMIENTO DE DEGRADACIÓN TÉRMICA DE LOS BIOSÓLIDOS MEDIANTE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA).....	71
FIGURA 21 GRÁFICA DEL RENDIMIENTO PROMEDIO DE PRODUCTOS LÍQUIDOS OBTENIDOS MEDIANTE PIRÓLISIS TÉRMICA	79
FIGURA 22 RENDIMIENTO PROMEDIO DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS MEDIANTE PIRÓLISIS TÉRMICA	80
FIGURA 23 COMPARACIÓN DE PROMEDIOS DE PRODUCCIÓN DE LÍQUIDO SEGÚN TRATAMIENTO TÉRMICO	87
FIGURA 24 VERIFICACIÓN DE SUPUESTO DE NORMALIDAD Y HOMOCEDASTICIDAD EN LA DIFERENCIA DE PRODUCCIÓN DE LÍQUIDOS	88

FIGURA 25 COMPARACIÓN DE PROMEDIOS DE CONSERVACIÓN DE SÓLIDOS SEGÚN TRATAMIENTO TÉRMICO	89
FIGURA 26 VERIFICACIÓN DE SUPUESTO DE NORMALIDAD Y HOMOCEDASTICIDAD EN LA DIFERENCIA DE CONSERVACIÓN DE SÓLIDOS	90
FIGURA 27 COMPARACIÓN DE PROMEDIOS DE CONSERVACIÓN DE SÓLIDOS SEGÚN TRATAMIENTO TÉRMICO	91
FIGURA 28 VERIFICACIÓN DE SUPUESTO DE NORMALIDAD Y HOMOCEDASTICIDAD EN LA DIFERENCIA DE PRODUCCIÓN DE GASES	92
FIGURA 29 CURVA DE DESTILACIÓN ASTM D86 DEL BIOACEITE EN COMPARACIÓN CON GASOLINA REGULAR Y DIÉSEL 2	95
FIGURA 30 ESPECTROFOTOMETRÍA DEL PRODUCTO LÍQUIDO OBTENIDO A 750°C	101
FIGURA 31 GRÁFICA DE LA CORRIDA EXPERIMENTAL A 700 °	119
FIGURA 32 GRÁFICA DE LA CORRIDA EXPERIMENTAL A 750 °C.....	119
FIGURA 33 GRÁFICA DE LA CORRIDA EXPERIMENTAL A 800 °C.....	120
FIGURA 34 GRÁFICA DE LA CORRIDA A 850 °C	120
FIGURA 35 CARACTERIZACIÓN DE LÍQUIDO PIROLÍTICO CON CURVA ASTM D86 SOFTWARE “DWSIM”	121
FIGURA 36 ELECCIÓN DE 30 PSEUDOCOMPONENTES PARA LIQUIDO DE PIROLISIS - SOFTWARE “DWSIM”	121
FIGURA 37 PSEUDOCOMPONENTES PARA EL LÍQUIDO DE PIROLISIS -SOFTWARE “DWSIM”	122
FIGURA 38 ELECCIÓN DE MÉTODOS Y CORRELACIONES PARA LA CARACTERIZACIÓN POR CURVA ASTM D86 DE LÍQUIDO DE PIROLISIS -SOFTWARE “DWSIM”	122
FIGURA 39 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN CON 30 PSEUDOCOMPONENTES PARA LIQUIDO DE PIROLISIS SOFTWARE “DWSIM”	123
FIGURA 40 RESULTADO DEL VALOR ESTIMADO POR EL SOFTWARE A 15.566 °C O 60°F DE LA DENSIDAD PARA COMPARACIÓN CON REALES DE LABORATORIO- SOFTWARE “DWSIM”	123

LISTADO DE ABREVIATURAS

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales: PTAR

Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier: FTIR

American Society for Testing and Materials: ASTM.

Análisis de Varianza: ANOVA

Aireación Extendida de Ciclo Intermitente: ICEAS

Sociedad Peruana de Hidrocarburos: SPH

Miles de barriles por día: MBPD

Millones de pies cúbicos por día: MMPCD

Análisis Termogravimétrico: TGA

Sólidos totales: ST

Sólidos suspendidos: SS

Demanda bioquímica de oxígeno: DBO

Sólidos suspendidos volátiles: SSV

Número más probable: NMP

Agencia de protección ambiental: EPA

Laboratorio de normalización de petróleo y derivados: LNPD

Unidades formadoras de colonias: UFC

RESUMEN

La creciente generación de biosólidos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales representa un desafío ambiental debido a las limitaciones para su disposición final. En este contexto, la pirólisis constituye una alternativa termoquímica para valorizar estos residuos, transformándolos en productos con potencial energético como bioaceite, biocarbón y gases combustibles. Inicialmente, se realizó la caracterización fisicoquímica de los biosólidos, obteniéndose un contenido de humedad de 2.024 %, cenizas de 49.696 %, materia volátil de 44.989 %, carbón fijo de 2.793 %, poder calorífico de 10.637 MJ/kg y densidad aparente de 0.7139 g/cm³. Con base en el análisis termogravimétrico (TGA), se seleccionaron las temperaturas de operación de 700, 750, 800 y 850 °C, empleando 50 g de muestra por ensayo. Los resultados fueron evaluados mediante un diseño experimental unifactorial y análisis de varianza (ANOVA), evidenciando que la temperatura influye significativamente en la distribución de los productos de pirólisis, alcanzándose el mayor rendimiento de bioaceite (21.1 % m/m) a 750 °C. El bioaceite obtenido fue caracterizado según las normas ASTM D445, ASTM D240 y ASTM D95, presentando una viscosidad de 47.718 cSt, poder calorífico de 18.5 MJ/kg, contenido de agua de 30 % v/v y densidad de 1.0217 g/cm³. El análisis mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) identificó la presencia de ésteres, cetonas, éteres, alcoholes, alcanos, fenoles, compuestos aromáticos y sustancias nitrogenadas, confirmando la complejidad química del bioaceite obtenido.

Palabras clave: Pirólisis, Biosólidos, Bioaceite, Rendimiento de Productos

ABSTRACT

The increasing generation of biosolids from wastewater treatment plants presents an environmental challenge due to limitations on their final disposal. In this context, pyrolysis offers a thermochemical alternative for valorizing these residues, transforming them into products with energy potential such as bio-oil, biochar, and combustible gases. Initially, the physicochemical characterization of the biosolids was performed, yielding a moisture content of 2.024%, ash content of 49.696%, volatile matter of 44.989%, fixed carbon of 2.793%, calorific value of 10.637 MJ/kg, and apparent density of 0.7139 g/cm³. Based on thermogravimetric analysis (TGA), operating temperatures of 700, 750, 800, and 850 °C were selected, using 50 g of sample per test. The results were evaluated using a one-way experimental design and analysis of variance (ANOVA), demonstrating that temperature significantly influences the distribution of pyrolysis products, with the highest bio-oil yield (21.1% w/w) achieved at 750 °C. The bio-oil obtained was characterized according to ASTM D445, ASTM D240, and ASTM D95 standards, exhibiting a viscosity of 47.718 cSt, a calorific value of 18.5 MJ/kg, a water content of 30% v/v, and a density of 1.0217 g/cm³. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis identified the presence of esters, ketones, ethers, alcohols, alkanes, phenols, aromatic compounds, and nitrogenous substances, confirming the chemical complexity of the bio-oil obtained.

Keywords: Pyrolysis, Biosolids, Bio oil, Product Yield

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1. Introducción

Los biosólidos son subproductos orgánicos resultantes de los procesos de tratamiento de aguas residuales. La producción mundial de biosólidos ha aumentado significativamente en las últimas décadas debido al crecimiento de la población y la generación de gran cantidad de aguas servidas, para ello se necesita una mayor conexión a sistemas de tratamiento para la calidad del agua y la protección del medio ambiente (Manahan, 2007).

La gran cantidad de biosólidos que genera La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de San Jerónimo son de aproximadamente 2 Tn/día esto genera problemas ambientales, principalmente en los vertederos, que son el destino final de estos residuos. Esta planta no cuenta con un mecanismo para aprovechar los lodos residuales que se generan ahí, por lo que son vertidos en el Relleno Sanitario de Haquira, generando costos de transporte, problemas de salud y graves problemas ambientales. Por ello, la investigación se centra en el tratamiento y aprovechamiento de biosólidos mediante procesos de pirólisis para la obtención de productos valiosos y necesarios, como combustibles líquidos o biocombustibles, que aseguren una mayor seguridad de suministro energético y menores emisiones de gases y partículas de efecto invernadero, mejor rendimiento de los vehículos y reducción de la demanda de petróleo (M. Martínez, 2012).

La pirólisis es un proceso termoquímico que convierte la materia orgánica en un combustible útil de alto rendimiento, calentándose a temperaturas altas de 600 a 800 °C en ausencia de oxígeno. Debido a su procesabilidad, es la forma más eficiente de competir con fuentes de combustibles no renovables (Gómez et al., 2008).

En este estudio, se realizó una investigación experimental de las tecnologías de pirólisis para el residuo existente. Los estudios experimentales pertinentes se realizaron en los laboratorios del Grupo de Investigación de Procesos Energéticos de la Universidad Nacional de Ingeniería, donde el tema principal fue la obtención de biocombustibles mediante el proceso termoquímico de pirólisis de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Jerónimo-Cusco.

En este trabajo de investigación el objetivo fue analizar el rendimiento de los productos líquidos obtenidos a través del proceso de pirólisis de los biosólidos generados durante el tratamiento de aguas residuales. Para lograr este objetivo, se planteó analizar y tratar los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Jerónimo - Cusco, para la producción de biocombustibles líquidos mediante el proceso de pirólisis, así mismo se necesitó estudiar el efecto de la temperatura sobre el rendimiento del producto líquido obtenido.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Descripción del problema

El crecimiento de la población y la demanda de agua potable generan un incremento en la cantidad de aguas residuales, las cuales, tras ser tratadas, producen grandes volúmenes de lodos. Con el tiempo, considerando factores como la ciudad, la población y la tasa de crecimiento, este volumen de lodos aumenta considerablemente. A nivel global, el sector del tratamiento de aguas residuales atraviesa una etapa crucial, enfrentando serios retos en la gestión del subproducto sólido generado durante el proceso, conocido como biosólidos o lodos de depuradora (Bonney et al., 2025).

Los biosólidos son residuos sólidos resultantes del tratamiento de aguas residuales, ya sean de origen doméstico o industrial. En varias naciones europeas, como los Países Bajos, Suiza, Bélgica y Alemania, más del 80 % de estos residuos se elimina principalmente mediante incineración. Esta práctica se ha ido consolidando durante las últimas tres décadas, impulsada por normativas ambientales estrictas que buscan restringir su disposición en rellenos sanitarios. Habitualmente, los biosólidos se gestionan a través de incineración, depósito en vertederos o aplicación en suelos (Pardo Martínez, 2024).

En numerosos países, particularmente en las grandes urbes, hay una tendencia creciente a reducir, reciclar y reutilizar los biosólidos de manera ambientalmente responsable. En Estados Unidos, más del 50 % de los biosólidos generados se reciclan como fertilizantes para el suelo, ayudando a mantener su productividad y a fomentar el crecimiento vegetal. Además, los biosólidos poseen un alto valor calorífico, lo que los convierte en una excelente opción para desarrollar métodos alternativos de combustión con recuperación de energía y un buen rendimiento (Vargas, 2017).

Espinoza & Santos de la Cruz (2021), señalan que, en Lima, capital del Perú, una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) puede llegar a generar hasta 2 513.2 toneladas de lodo diariamente. Un ejemplo de ello son las plantas de tratamiento de Manchay, que opera con el sistema ICEAS (Aireación Extendida de Ciclo Intermitente), y la planta de Santa Clara, que utiliza el sistema de aireación extendida, donde la producción mensual de lodos centrifugados alcanza aproximadamente 517.1 toneladas y 1 745.8 toneladas, respectivamente. En la actualidad, el 42 % de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el Perú gestionan sus lodos directamente dentro de las propias instalaciones. Un 31 % los transporta a rellenos sanitarios o botaderos, principalmente por la limitada disponibilidad de rellenos sanitarios autorizados en el país. Solo el 6 % destina estos lodos a terceros con fines agrícolas (Levano et al., 2025).

Por sus condiciones microbiológicas y parasitarias estos lodos representan un peligro para la salud pública porque incluyen bacterias, virus, helmintos, los protozoos y los metales pesados, entre otros, deben procesarse adecuadamente para poder utilizarlos de forma beneficiosa con fines agrícolas, por ejemplo. Por ello, se reconoce la necesidad de disminuir la cantidad de patógenos antes de la disposición del biosólido en áreas donde la población pueda tener contacto con él (Mahamud López et al., 1996).

El uso de lodos tratados (biosólidos) provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) podría significar un importante ahorro en la producción de fertilizantes. No obstante, su aplicación en la agricultura se ve restringida por la presencia de contaminantes químicos y microbiológicos, los cuales representan riesgos para los cuerpos de agua y la salud pública (Fytili & Zabaniotou, 2008). Ante esta situación, la pirólisis térmica surge como una alternativa tecnológica innovadora y con gran potencial, ya que permite reducir el volumen de los residuos, estabilizar los contaminantes y obtener subproductos útiles como biocarbón, bioaceite y gases combustibles (Wei et al., 2021).

Por otro lado, la producción de petróleo en 2023 fue en promedio de 38 695 BPD, un 4.5% menos que en 2022 (40 538 BPD). Estos resultados aún están lejos de los niveles de producción previos a la pandemia. El promedio anual para 2019 alcanzó los 52 984 barriles por día, un aumento del 27% respecto al año anterior. El actual director de Gas y Energía para América Latina (Álvaro Ríos), señaló que para 2024 se espera que la producción petrolera del Perú registre una tendencia a la baja debido a riesgos asociados como interrupciones en el transporte, conflictos sociales y ambientales. La Sociedad

Peruana de Hidrocarburos (SPH) informó que, en noviembre de 2025, la producción de petróleo en el Perú alcanzó los 36.56 miles de barriles por día (MBPD), lo que significó una reducción del 19 % respecto al mismo mes de 2024, de acuerdo con datos proporcionados por Perupetro. En cuanto al gas natural, se registró un leve incremento en la producción mensual, pasando de 1 346 millones de pies cúbicos por día (MMPCD) en octubre a 1 365 MMPCD en noviembre de 2025. Sin embargo, al compararlo con el mismo mes del año anterior, se evidencia una disminución del 9 % (Energiminas, 2025).

Debido a la creciente demanda de combustibles y la generación de residuos, actualmente se están investigando técnicas para producir combustibles líquidos de manera más eficiente y reducir la contaminación a gran escala. El proceso de pirólisis es una de las opciones más efectivas para llevar a cabo la descomposición térmica en ausencia de oxígeno, con temperaturas que van de los 400 °C a los 1000 °C, produciendo fracciones gaseosas, líquidas y sólidas que pueden ser aprovechadas (Aracil, 2008). Este es el proceso inicial en cualquier conversión termoquímica y permite obtener productos en estado sólido, líquido y gaseoso. El rendimiento de estos productos puede mejorarse ajustando los parámetros del proceso y las propiedades de la materia prima. Las variables involucradas en el proceso se agrupan en dos categorías principales: el perfil de calentamiento y la atmósfera de reacción. En general, los biocombustibles se consideran una alternativa energética más sostenible en comparación con la quema de combustibles fósiles, que generan emisiones de gases de efecto invernadero y contribuyen al cambio climático (Valdés & Palacios, 2016).

En esta investigación se obtuvo productos líquidos a través de la pirólisis de biosólidos provenientes de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, como punto inicial para la producción de bioaceites que aporten a la matriz energética nacional. Se determinó experimentalmente la temperatura (°C) adecuada en relación con la materia prima durante el proceso de producción de bioaceites. Las condiciones ideales que generaron un alto rendimiento de productos líquidos serán las seleccionadas para el análisis de resultados.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema General

- ¿Cuál es el rendimiento de los productos líquidos obtenidos a partir de la pirólisis de los biosólidos generados por la PTAR de San Jerónimo-Cusco?

1.3.2. Problemas Específicos

- ¿Cuáles son las características fisicoquímicas y biológicas de los biosólidos de la PTAR de San Jerónimo, Cusco?
- ¿Cuál es el efecto de la temperatura en el rendimiento de los productos líquidos obtenidos a través de la pirólisis de los biosólidos generados?
- ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del producto líquido obtenido en condiciones de mayor rendimiento a partir de la pirólisis de los biosólidos generados?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Evaluar el rendimiento de los productos líquidos obtenidos a partir de la pirólisis de los biosólidos generados en la PTAR de San Jerónimo, Cusco.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los biosólidos de la PTAR de San Jerónimo, Cusco.
- Evaluar el efecto de la temperatura en el rendimiento de los productos líquidos obtenidos a través de la pirólisis de los biosólidos generados.
- Determinar las características fisicoquímicas de los productos líquidos obtenidos bajo las condiciones que resultaron en un mayor rendimiento en la pirólisis de los biosólidos generados.

1.5. Justificación

La gestión de biosólidos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales constituye uno de los principales desafíos ambientales y operativos en ciudades en crecimiento como Cusco. En particular, la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Jerónimo, produce cantidades significativas de lodos residuales cuyo manejo inadecuado puede generar impactos negativos, tales como contaminación del suelo y agua, emisión de gases de efecto invernadero y riesgos para la salud pública.

En este contexto, la presente investigación propone evaluar el rendimiento del proceso de pirólisis como una alternativa tecnológica para el aprovechamiento de dichos

biosólidos, transformándolos en productos de valor agregado, principalmente en combustible líquido. El estudio incluyó pruebas experimentales para la evaluación de la tecnología de pirólisis para el residuo disponible y se determinó y analizó el rendimiento del producto obtenido, así como sus características fisicoquímicas.

La pirólisis, como proceso termoquímico en ausencia de oxígeno, permite reducir significativamente el volumen de los lodos y convertirlos en recursos energéticos útiles, alineándose con los principios de economía circular y sostenibilidad ambiental.

La importancia de este estudio radica en que no solo aborda la problemática de la disposición final de biosólidos, sino que también plantea una solución innovadora orientada a la valorización energética de residuos. De esta manera, se contribuye a la reducción de la carga ambiental asociada a la acumulación de lodos, se optimiza la gestión de residuos en la planta y se promueve el uso de fuentes alternativas de energía.

Asimismo, esta investigación resulta pertinente a nivel local y regional, debido a la limitada implementación de tecnologías avanzadas para el tratamiento de biosólidos en el Perú. Los resultados obtenidos podrán servir como base técnica para futuras aplicaciones e investigaciones.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Antecedentes internacionales

En el trabajo de investigación de Meza et al., (2025), denominado “INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS OPERACIONALES EN LA PIROLISIS DE BIOMASA CON REACTORES AUGER”, tuvo como objetivo revisar los avances en el uso de reactores Auger en la pirólisis de biomasa, así como analizar la influencia de los parámetros operacionales en la obtención de productos y las técnicas de caracterización del bio-aceite. La investigación se desarrolló bajo un enfoque de revisión sistemática, utilizando la base de datos Scopus para recopilar información científica publicada entre 2017 y 2024, mediante el uso de palabras clave relacionadas con pirólisis, biomasa, residuos y reactores Auger. Asimismo, se determinó que las características y proporciones de estos productos dependieron de variables como el tipo de biomasa, la temperatura, la tasa de calentamiento, el tiempo de residencia y el tamaño de partícula. Además, se identificó que los reactores Auger presentaron ventajas como flexibilidad operativa, facilidad de manejo y potencial de aplicación a pequeña escala. Finalmente, el estudio concluyó que factores como el pretratamiento de la materia prima, la temperatura y el flujo de gas de arrastre influyeron de manera significativa en la calidad de los productos obtenidos, por lo que su optimización resultó fundamental para mejorar la eficiencia del proceso de pirólisis.

La investigación de Hakeem et al., (2022), denominado “AVANCES EN LA PIRÓLISIS DE BIOSÓLIDOS: PAPEL DE LOS PRETRATAMIENTOS, LOS CATALIZADORES Y LA COALIMENTACIÓN EN LA DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTOS Y LA PRODUCCIÓN QUÍMICA DE ALTO VALOR”, se centró en realizar una revisión crítica sobre la pirólisis de biosólidos con el objetivo de analizar cómo los pretratamientos, los catalizadores y la coalimentación influían en la conversión térmica y en la calidad del biocarbón, bioaceite y gas obtenidos. La metodología consistió en recopilar y comparar resultados experimentales disponibles en la literatura, identificando los efectos de cada estrategia de mejora. Los autores encontraron que los pretratamientos, especialmente los ácidos, reducían minerales y metales pesados, facilitando una pirólisis más eficiente. También observaron que la catálisis disminuía la formación de alquitrán y mejoraba la selectividad del proceso, mientras que la

coalimentación generaba efectos sinérgicos que incrementaban el rendimiento y la calidad de los productos. Se concluyó que la combinación de estas intervenciones podía potenciar significativamente la valorización de biosólidos mediante pirólisis, aunque persistían desafíos relacionados con la presencia de metales pesados, la estabilidad del bioaceite y la necesidad de optimizar el proceso para aplicaciones comerciales.

En el trabajo de investigación de Alarcón & Viltres (2022), denominado “CARACTERIZACION QUÍMICA DEL BIO ACEITE DE PIRÓLISIS RÁPIDA DE BIOMASA” tuvo como objetivo caracterizar químicamente el bio-aceite obtenido a partir de la pirólisis rápida de una mezcla de biomasa compuesta por capín de elefante y paja de caña de azúcar, con el fin de evaluar su potencial como biocombustible. La investigación fue de tipo experimental. Se empleó un reactor de lecho fluidizado para llevar a cabo la pirólisis rápida a temperaturas entre 500 y 550 °C, utilizando biomasa previamente caracterizada mediante normas ASTM. Posteriormente, el bio-aceite obtenido fue sometido a análisis fisicoquímicos y a técnicas de cromatografía gaseosa acoplada a espectrometría de masas para identificar su composición química. Los resultados evidenciaron que el proceso generó principalmente una fracción líquida cercana al 60%, además de carbón y gases no condensables. Se identificaron 93 compuestos orgánicos en el bio-aceite, predominando los compuestos oxigenados como fenoles, ácidos carboxílicos y derivados del furano. Asimismo, el bio-aceite presentó un poder calorífico de 20.20 MJ/kg, lo que indica su potencial energético, aunque también mostró alta viscosidad, acidez y contenido de oxígeno. En conclusión, la investigación determinó que el bio-aceite obtenido posee una composición química compleja y propiedades que permiten considerarlo como una fuente potencial de energía. Sin embargo, sus características, como la alta viscosidad, inestabilidad química y contenido de compuestos oxigenados, limitan su uso directo como combustible, siendo necesario someterlo a procesos de mejora para su aplicación en el sector energético.

En el trabajo de investigación de Ghodke et al., (2021), denominado “PIRÓLISIS DE LODOS DE DEPURADORA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SOSTENIBLES Y BIOCARBON DE VALOR AÑADIDO”. Esta investigación analizó la pirólisis de lodos de depuradora con el propósito de evaluar su potencial para la producción de biocombustibles y biocarbón de valor agregado. Los objetivos fueron determinar la influencia de la temperatura en el rendimiento de los productos de pirólisis, caracterizar la materia prima y los productos obtenidos (bioaceite,

biocarbón y gases), y estimar los parámetros cinéticos del proceso mediante el método de Coats-Redfern. La metodología consistió en la recolección y preparación de lodos de depuradora, los cuales fueron sometidos a un proceso de pirólisis en un reactor de lecho fijo dentro de un rango de temperatura de 250 a 700 °C en atmósfera inerte. Los resultados mostraron que la temperatura óptima de 500 °C permitió obtener rendimientos de 22.4 % de bioaceite, 18.9 % de gases y 58.7 % de biocarbón. El bioaceite presentó características adecuadas como combustible, con una relación H/C elevada y baja relación O/C. Asimismo, los gases de pirólisis contenían una proporción significativa de compuestos combustibles, mientras que el biocarbón evidenció un alto contenido de nutrientes, lo que indicó su potencial uso como fertilizante. En conclusión, la investigación demostró que la pirólisis de lodos de depuradora fue una alternativa viable y sostenible para la valorización de residuos, ya que permitió la obtención de productos energéticos y materiales con aplicaciones industriales y agrícolas. Además, el estudio contribuyó a comprender el comportamiento cinético del proceso, lo cual resulta fundamental para su optimización a escala industrial.

La investigación de Naqvi et al., (2021), denominado “AVANCES RECIENTES EN LA PIRÓLISIS DE LODOS DE DEPURADORA Y SU CINÉTICA: RECUPERACIÓN DE RECURSOS, PLATAFORMAS TERMOGRAVIMÉTRICAS Y PERSPECTIVAS INNOVADORAS”. El estudio tuvo como objetivo realizar una revisión crítica de los avances en la pirólisis de lodos residuales, con énfasis en su comportamiento cinético y en la identificación de condiciones óptimas de operación para maximizar la obtención de biocombustibles y otros productos de valor. Asimismo, se buscó analizar los parámetros de diseño del proceso y evaluar nuevas herramientas, como los enfoques de aprendizaje automático, para mejorar la predicción del comportamiento térmico. Se analizaron estudios experimentales que utilizaron técnicas como el análisis termogravimétrico (TGA) para evaluar la degradación térmica de los lodos residuales. Además, se examinaron diversos modelos cinéticos, tanto isotérmicos como no isotérmicos, incluyendo modelos de reacción simple, reacciones múltiples y métodos como Kissinger-Akahira-Sunose y Coats-Redfern. También se consideraron herramientas de modelado matemático y enfoques de aprendizaje automático aplicados a la predicción de parámetros cinéticos. Los resultados principales evidenciaron que la pirólisis de lodos residuales permitió la obtención de productos energéticos como bioaceite, biogás y biocarbón, cuyo rendimiento dependió significativamente de variables

como la temperatura, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia y el tamaño de partícula. Se determinó que el análisis termogravimétrico fue fundamental para comprender la cinética del proceso y calcular parámetros clave como la energía de activación y la velocidad de reacción. Asimismo, se identificó que los modelos cinéticos y las herramientas computacionales, incluidos los enfoques de aprendizaje automático, resultaron útiles para optimizar el diseño de reactores y predecir el comportamiento térmico de los lodos. Se concluyó que la pirólisis constituyó una alternativa prometedora para la valorización de lodos residuales, al permitir la recuperación de energía y la reducción del impacto ambiental. Sin embargo, se señalaron desafíos importantes para su implementación a gran escala, como la optimización de las condiciones operativas, la mejora de la calidad de los biocombustibles y la viabilidad económica del proceso. En este sentido, el estudio destacó la necesidad de continuar investigando en el desarrollo de modelos predictivos y tecnologías que faciliten su aplicación industrial.

En el trabajo de investigación de Ordóñez (2019), denominado “DETERMINACIÓN DEL PROCESO ÓPTIMO DE PIRÓLISIS DE LODOS RESIDUALES, PARA LA MAYOR EFICIENCIA DE PRODUCTO SÓLIDO”. El estudio tuvo como objetivo determinar las condiciones óptimas del proceso de pirólisis de lodos residuales, con el fin de maximizar la eficiencia en la obtención del producto sólido, evaluando principalmente la influencia de variables como la temperatura y el tiempo de reacción. La investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental. Como materia prima se utilizó lodo residual proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales, el cual fue sometido a un proceso de secado previo y posterior activación química con cloruro de zinc. Luego, las muestras fueron tratadas mediante pirólisis en un reactor tipo batch, empleando diferentes combinaciones de temperatura (200 °C, 230 °C y 290 °C) y tiempo (90, 120 y 150 minutos). Los resultados evidenciaron que el rendimiento del producto sólido estuvo directamente influenciado por las condiciones operativas, alcanzando un valor máximo de 78.84 %. Se determinó que la mejor combinación de parámetros fue una temperatura de 230 °C y un tiempo de 90 minutos. Asimismo, se observó que el incremento tanto de la temperatura como del tiempo provocó una disminución en el rendimiento del producto sólido. El análisis estructural mostró que el material obtenido presentó una superficie irregular y porosa, favorable para su uso como adsorbente, además de contener metales pesados provenientes del lodo original. Se concluyó que el proceso de pirólisis constituyó una alternativa viable para la valorización

de lodos residuales, permitiendo obtener un producto sólido con potencial de aplicación ambiental. Sin embargo, se estableció que el tiempo fue la variable más influyente en el proceso, mientras que el aumento simultáneo de temperatura y tiempo redujo la eficiencia del rendimiento, lo que resalta la importancia de optimizar las condiciones operativas para mejorar los resultados.

En el trabajo de investigación elaborado por Chukwuneke et al., (2019), denominado “ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DEL BIOACEITE PIROLIZADO DE MADERA DE *Swietenia macrophylla* (CAOBA)” tuvo como objetivo analizar las propiedades fisicoquímicas del bioaceite obtenido mediante pirólisis de madera de caoba (*Swietenia macrophylla*), con el fin de evaluar su potencial como fuente de energía renovable y su posible aplicación industrial. La metodología empleada fue de tipo experimental. La biomasa utilizada fue previamente secada, triturada y tamizada hasta obtener un tamaño de partícula uniforme. Posteriormente, el material fue sometido a un proceso de pirólisis rápida en un reactor de lecho fijo, a temperaturas comprendidas entre 425 y 500 °C. Los resultados mostraron que la temperatura influyó significativamente en el rendimiento del bioaceite, alcanzándose un valor máximo de 69.5 % en peso a 450 °C. Asimismo, se evidenció que el incremento de la temperatura redujo la producción de biocarbón y aumentó la formación de gases. El bioaceite obtenido presentó un contenido considerable de carbono, hidrógeno y oxígeno, además de un poder calorífico adecuado, aunque inferior al de los combustibles fósiles debido a su alto contenido de humedad. El análisis químico reveló la presencia de diversos compuestos orgánicos, como ácidos, fenoles, alcoholes, cetonas y aldehídos, lo que indica su potencial tanto energético como industrial. Se concluyó que la madera de caoba constituyó una materia prima viable para la producción de bioaceite mediante pirólisis, destacándose su rendimiento y composición química. No obstante, se señaló que, para su uso eficiente como combustible, sería necesario mejorar sus propiedades mediante procesos de refinamiento o actualización.

En el trabajo de investigación elaborado por Mendoza et al., (2019), denominado “TRATAMIENTO TÉRMICO DE BIOSÓLIDOS PARA APLICACIONES ENERGÉTICAS PIROLISIS Y CONVERSIÓN DE SUS ALQUITRANES”, tuvo como objetivo principal evaluar el proceso de pirólisis de biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, así como analizar la conversión de los alquitranes generados durante dicho proceso con fines energéticos. La investigación se desarrolló mediante un enfoque experimental, utilizando biosólidos de la PTAR El Salitre en

Bogotá, los cuales fueron previamente caracterizados como combustible. Se llevaron a cabo ensayos de pirólisis en laboratorio empleando una retorta bajo condiciones estandarizadas y un equipo de termogravimetría, variando temperaturas y tasas de calentamiento. Asimismo, se estudió la degradación de alquitranes en un reactor de dos zonas, incorporando un lecho de carbón activado y modificando variables como temperatura, tiempo de residencia y área superficial. Los resultados evidenciaron que la pirólisis permitió obtener fracciones gaseosas compuestas principalmente por CO, CO₂, CH₄ e H₂, además de productos líquidos y sólidos. Se determinó que la conversión de alquitranes dependió significativamente de las condiciones operativas del reactor, logrando reducir su contenido y mejorar la calidad del gas producido. Además, se establecieron parámetros cinéticos mediante modelos matemáticos que describieron adecuadamente tanto la pirólisis como la degradación de alquitranes. En conclusión, la investigación demostró que la pirólisis de biosólidos constituye una alternativa viable para su valorización energética, ya que permite reducir compuestos indeseables y mejorar las características del gas generado. Asimismo, los resultados obtenidos aportaron información relevante para el diseño y optimización de procesos a mayor escala, contribuyendo al desarrollo de tecnologías sostenibles para el aprovechamiento de residuos.

Mancheno et al., (2017), en su investigación “ANÁLISIS FISICOQUÍMICO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS OBTENIDOS EN EL PROCESO DE PIRÓLISIS DE CAUCHO VULCANIZADO”, tuvo como objetivo analizar las propiedades fisicoquímicas de los combustibles líquidos obtenidos mediante el proceso de pirólisis de caucho vulcanizado, así como evaluar su viabilidad como alternativa al diésel comercial desde un enfoque ambiental y de desempeño en motores. La metodología empleada fue de tipo experimental. Se llevó a cabo el proceso de pirólisis en un reactor tipo batch en ausencia de oxígeno, evaluando variables como temperatura, presión y tiempo de residencia para optimizar la producción de combustible líquido. Posteriormente, se realizó la caracterización fisicoquímica del producto mediante normas técnicas estandarizadas y equipos especializados. Además, se efectuaron pruebas de combustión en un motor diésel a diferentes regímenes de operación (800 y 2500 rpm), donde se midieron emisiones gaseosas, material particulado, opacidad, así como ruido y vibraciones para identificar fallos en la combustión. Los resultados mostraron que la temperatura fue la variable más influyente en el rendimiento del proceso, estableciéndose

un valor óptimo cercano a 376 °C. El combustible obtenido presentó características similares a fracciones de gasolina, queroseno y diésel. Sin embargo, en las pruebas de combustión se evidenció que, aunque en ciertos parámetros como emisiones de NOx cumplía con límites normativos, el combustible pirolítico generó mayores emisiones de monóxido de carbono, partículas y opacidad en comparación con el diésel comercial. Asimismo, se observaron mayores niveles de ruido y vibraciones, indicando un desempeño menos eficiente y mayor desgaste del motor. Se concluyó que la investigación determinó que, a pesar de que el combustible derivado de la pirólisis presenta propiedades similares al diésel, no puede ser utilizado como sustituto directo debido a sus mayores niveles de emisiones contaminantes y a los problemas asociados en el proceso de combustión, lo que limita su viabilidad como alternativa energética sostenible.

Kumar & Nanda (2016), en su investigación “TÉCNICAS DE TRATAMIENTO TÉRMICO Y MICROBIANO PARA LA DEGRADACIÓN DE PFAS EN BIOSÓLIDOS: UN ENFOQUE EN LOS MECANISMOS Y VÍAS DE DEGRADACIÓN”, tuvo como objetivo analizar el estado actual de la pirólisis de biomasa, así como identificar sus principales avances tecnológicos, tipos de reactores y proyecciones futuras en la producción de biocombustibles. La investigación se desarrolló bajo un enfoque de revisión bibliográfica, en la cual se analizaron más de 60 estudios científicos relacionados con la pirólisis de biomasa. Se examinaron aspectos como los tipos de procesos (lento, intermedio, rápido y flash), las condiciones operativas, los rendimientos de productos y las configuraciones de reactores utilizados en la conversión termoquímica de la biomasa. Los resultados evidenciaron que la pirólisis permite transformar la biomasa en productos como bioaceite, gas y biocarbón, siendo la pirólisis rápida la más eficiente para la obtención de bioaceite, con rendimientos que pueden alcanzar hasta aproximadamente 85%. Asimismo, se identificó que el tipo de reactor y las condiciones de operación influyen significativamente en la calidad y cantidad de los productos obtenidos. Además, se destacó el potencial del bioaceite como alternativa energética por su capacidad de almacenamiento y transporte. En conclusión, se determinó que la pirólisis de biomasa constituye una tecnología prometedora para la producción de energía renovable y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. No obstante, se señaló la necesidad de continuar con investigaciones orientadas a mejorar el diseño de reactores, optimizar la calidad del bioaceite y desarrollar procesos más eficientes y económicamente viables.

En el trabajo de investigación elaborado por Mendoza (2016), denominado “PIRÓLISIS DE BIOSÓLIDOS EN HORNO ROTATORIO”. El estudio tuvo como objetivo evaluar el proceso de pirólisis de lodos de depuradora, con énfasis en la influencia de las variables operativas sobre la formación y conversión de productos, así como en la reducción de alquitranes y la obtención de biocombustibles. Asimismo, buscó analizar las reacciones primarias y secundarias del proceso y desarrollar un modelo que permitiera describir su comportamiento cinético. La metodología empleada fue de tipo experimental a escala de laboratorio. Se analizaron las reacciones primarias mediante una balanza termogravimétrica y las reacciones secundarias en un reactor de lecho fijo de dos etapas. Posteriormente, se realizaron ensayos en un horno rotatorio de calentamiento indirecto, donde se evaluaron variables como la temperatura final del proceso y el tiempo de residencia de la fase volátil. Además, se complementó el estudio con un análisis teórico-experimental para describir los mecanismos de transporte del material y se desarrolló un modelo matemático del proceso. Los resultados principales evidenciaron que las condiciones de operación, especialmente la temperatura y el tiempo de residencia, influyeron significativamente en la conversión de los compuestos volátiles y en la reducción de alquitranes. Asimismo, se logró proponer un modelo cinético semiglobal basado en múltiples reacciones paralelas que permitió representar adecuadamente el comportamiento del proceso. También se identificó que el control de las reacciones secundarias favoreció la mejora en la calidad de los productos obtenidos. En conclusión, la investigación demostró que la pirólisis de lodos de depuradora en un horno rotatorio constituye una alternativa viable para la valorización de residuos, ya que permite optimizar la conversión de compuestos y reducir subproductos no deseados. Además, el modelo desarrollado aportó una herramienta útil para la comprensión y posible escalamiento del proceso a nivel industrial.

En el trabajo de investigación elaborado por Alvarez et al., (2016), denominado, “CARACTERIZACIÓN DEL BIO-OIL OBTENIDO POR PIRÓLISIS RÁPIDA DE LODOS DE DEPURADORA EN UN REACTOR CÓNICO DE LECHO EN SURTIDOR”, se realizó un estudio cuyo propósito fue describir el bioaceite extraído de la pirólisis rápida de lodos de plantas de tratamiento, utilizando un reactor cónico de lecho en surtidor (CSBR). El principal objetivo de este trabajo fue analizar cómo la temperatura de funcionamiento afectaba el rendimiento, la composición química y las características fisicoquímicas del bioaceite, para así evaluar su capacidad como combustible alternativo

y las posibles formas de aprovechamiento. Para lograrlo, los investigadores realizaron pruebas continuas de pirólisis en un rango de temperatura de 450 a 600 °C, examinando los productos a través de cromatografía de gases, FTIR y análisis elemental, y determinaron propiedades como la densidad, viscosidad, pH, contenido de agua y poder calorífico. Además, se analizó el impacto de la temperatura en los rendimientos de bioaceite, carbón y gas, y se examinó el comportamiento específico del bioaceite producido a 500 °C, temperatura en la que se conseguía el mayor rendimiento líquido. Los resultados obtenidos indicaron que el máximo rendimiento de bioaceite se lograba a 500 °C, alcanzando aproximadamente un 77 % libre de cenizas. Se encontró que los principales componentes eran compuestos oxigenados y nitrogenados, incluyendo fenoles, cetonas, alcoholes, amidas y nitrilos. Asimismo, se observó que el bioaceite tenía menores concentraciones de oxígeno y mayores cantidades de carbono e hidrógeno en comparación con productos de biomasa lignocelulósica, lo que se traducía en un poder calorífico superior. El análisis de destilación simulada mostró que una parte considerable del nitrógeno presente correspondía a fracciones similares al gasóleo. Se concluyó que el bioaceite derivado de lodos de plantas de tratamiento mostró características prometedoras para su utilización como fuente de energía, ya que algunos de sus parámetros eran comparables a los de combustibles convencionales. Sin embargo, también se indicó que era indispensable implementar tratamientos adicionales para disminuir los niveles de nitrógeno y mejorar el poder calorífico, con el fin de optimizar su rendimiento como combustible.

El trabajo de investigación elaborado por Aragonez (2015), denominado “ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO DE LA PIRÓLISIS DE BIOSÓLIDOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EL SALITRE”, se desarrolló una investigación cuyo objetivo fue caracterizar física y químicamente los biosólidos generados en la PTAR El Salitre y analizar su comportamiento durante la pirólisis a escala de laboratorio. Además, se propuso evaluar la distribución de productos sólidos, líquidos y gaseosos, así como determinar parámetros cinéticos mediante análisis termogravimétrico. La metodología incluyó análisis próximo, elemental, poder calorífico y composición química mediante espectroscopia de absorción atómica, junto con estudios de difracción y fluorescencia de rayos X. Posteriormente, se ejecutó la pirólisis en dos sistemas: uno basado en la norma ISO 647 para cuantificar y caracterizar las fracciones de productos, y otro mediante termogravimetría, variando el diámetro de partícula, la

masa de muestra y la tasa de calentamiento. Con los datos obtenidos se desarrolló un estudio cinético utilizando modelos de reacciones paralelas. Los resultados mostraron que los biosólidos presentaban altos contenidos de ceniza y materiales inorgánicos, así como una composición con metales pesados retenidos principalmente en el residuo sólido tras la pirólisis. En la termogravimetría se identificaron varias etapas de degradación térmica y se determinó que la tasa de calentamiento influía en las temperaturas de reacción y en la velocidad de descomposición. El análisis cinético permitió obtener parámetros consistentes con los modelos reportados en la literatura. Se concluyó que los biosólidos de la PTAR El Salitre eran susceptibles de ser valorizados mediante pirólisis y que el carbonizado retenía gran parte de los metales pesados. Asimismo, estableció que la caracterización y el análisis cinético aportaban información esencial para diseñar procesos a mayor escala.

En el trabajo de investigación elaborado por Urien (2013), denominado “OBTENCIÓN DE BIOCARBONES Y BIOCOMBUSTIBLES MEDIANTE PIROLISIS DE BIOMASA RESIDUAL”, tuvo como objetivo analizar la obtención de biocarbones y biocombustibles a partir de biomasa residual mediante un proceso de pirólisis, evaluando especialmente la influencia de la temperatura en la distribución y características de los productos generados. Asimismo, se buscó caracterizar las fracciones obtenidas (biocarbón, bioaceites y gases), desarrollar un tratamiento para mejorar el uso de los ácidos piroleñosos como biocombustibles y explorar posibles aplicaciones del biocarbón. La investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental, empleando madera residual de abeto (*Abies alba*) como materia prima. Esta fue previamente triturada y sometida a un proceso de pirólisis en una planta piloto basada en la tecnología GRAUTHERMIC-BIO. Los ensayos se realizaron a diferentes temperaturas (400, 500 y 600 °C), registrando los rendimientos de las fracciones sólida, líquida y gaseosa. Posteriormente, se aplicaron diversos análisis físico-químicos y técnicas instrumentales para caracterizar cada producto obtenido, incluyendo análisis elemental, termogravimetría, cromatografía de gases y espectrometría. Los resultados mostraron que la temperatura influyó significativamente en la distribución de los productos, observándose que el incremento térmico favoreció la formación de gases en detrimento del biocarbón y los líquidos. El biocarbón obtenido presentó propiedades energéticas comparables a carbones convencionales, además de características texturales que permiten su aplicación en distintos campos. Por otro lado, los bioaceites evidenciaron una

composición compleja y limitaciones para su uso directo como combustible, debido a su alta acidez, contenido de agua y baja estabilidad. En cuanto a los gases, estos presentaron un contenido energético aprovechable, principalmente por la presencia de hidrógeno y metano. Se concluyó que la pirólisis de biomasa residual constituyó una alternativa viable para la valorización energética, aunque el aprovechamiento eficiente de los productos líquidos requirió procesos adicionales de mejora. Además, se destacó que el control de las condiciones operativas, especialmente la temperatura, resultó determinante para optimizar la obtención de productos con mayor valor energético y potencial de aplicación.

2.2.Bases Teóricas

2.2.1. Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de San Jerónimo

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de San Jerónimo se ubica en la Comunidad de Collana, esta planta se encarga de recoger y procesar las aguas residuales de la ciudad de Cusco. Esta instalación lleva a cabo un tratamiento inicial, tanto primario como secundario, empleando métodos aeróbicos y anaeróbicos. Este proceso es de tipo biológico y utiliza filtros percoladores (digestores biológicos) que tienen una capacidad de 6 000 m³, los cuales manejan un flujo promedio de 550 L/s, alcanzando un máximo de 802 L/s. Gracias a estos métodos, se logra disminuir la cantidad de lodos, producir un lodo inerte y generar biogás (metano), el cual se usa para el tratamiento de los lodos, lo que ayuda a bajar los costos operativos (EPS SEDACUSCO S.A., 2022).

2.2.2. Lodos de aguas residuales

Son subproductos del tratamiento de aguas residuales que se forman durante los procesos primario, secundario y terciario. Estos desechos acuosos contienen coloides, partículas y a veces contaminantes peligrosos como metales pesados y compuestos orgánicos. La cantidad de lodos generados depende de la eficiencia del método de tratamiento. Las aguas residuales generadas en actividades productivas y domésticas deben ser depuradas en plantas de tratamiento para su reutilización o un tratamiento final más efectivo (Ortiz & Gutiérrez, 1995).

2.2.3. Clasificación del uso de lodos

En el proceso de disposición final y aprovechamiento de los lodos residuales generados en las plantas de tratamiento, se debe conocer los tipos de sedimentos, su origen y su clasificación para su respectivo aprovechamiento (Barzola & Reyes, 2019).

2.2.4. Tipos de lodos generados según el grado de tratamiento de aguas residuales

➤ Lodos crudos

Son lodos no tratados o no estabilizados, que pueden eliminarse de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Esto produce la acidificación de la digestión y del olor (Torres et al., 2007).

➤ Lodos primarios

Se separan mediante decantación primaria, que elimina los sólidos sedimentables. Está compuesto por sólidos orgánicos, sólidos inorgánicos y arena fina. La composición se caracteriza por ser un líquido espeso con un porcentaje de agua entre 93 y 97%, de color marrón a gris, se vuelve séptico y produce un mal olor (Torres et al., 2007).

➤ Lodos secundarios

Se caracterizan por tener un color marrón y como suelen estar bien aireados, no desarrollan olores tan rápidamente como los lodos primarios; debido a que no están suficientemente aireados, se vuelven más oscuros y huelen tan fuerte como el lodo primario (Valderrama, 2013).

➤ Lodo Digerido

Tiene un color marrón oscuro y negro y contienen gases, cuando se digiere bien casi no produce olor o bien produce un olor relativamente débil que no es desagradable (Torres et al., 2010).

En la siguiente tabla 1 se observa la caracterización de los lodos producidos en procesos de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 1*Caracterización de lodos generados en procesos de tratamiento de aguas residuales*

Parámetros	Lodos Primarios	Lodos Secundarios	Lodos Digeridos
	(Sin adición de químicos)	(Licor mezcla de lodos activos)	(Mezcla)
pH	5.5-6.5	6.5-7.5	6.8-7.6
Contenido de agua (%)	92-96	97.5-98	94-97
SSV (%SS)	70-80	80-90	55-65
Grasas (%SS)	12-14	3-5	4-12
Proteínas (%SS)	4-14	20-30	10-20
Carbohidratos (%SS)	8-10	6-8	5-8
Nitrógeno (%SS)	2-5	1-6	3-7
Fosforo (%SS)	0.5-1.5	1.5-2.5	0.5-1.5
Bacterias patógenas (NMP/100ml)	10 ³ -10 ⁵	100-1000	10-100
Metales pesados (%SS) (Zn, Cu, Pb)	0.2-2	0.2-2	0.2-2
SSV: Solidos suspendidos volátiles, NMP: Numero más probable, SS: Solidos suspendidos.			

*Nota. Adaptado de M. García (2016).***2.2.5. Tipos de Lodos según Nivel de aprovechamiento**

Los lodos se clasifican principalmente según su calidad microbiológica y su contenido de metales pesados:

- **Lodos Peligrosos**

Son aquellos que contienen contaminantes tóxicos según EPA (Unidad States Environmental Protection Agency) Secciones 260 y 261 (Agencia et al., 2002).

- **Lodos No Peligrosos**

Son aquellos lodos no peligrosos cuya calidad depende de su contenido de metales pesados según la concentración de partículas propuestas por la EPA para lograr una mejor calidad (Agencia et al., 2002).

La tabla 2 muestra la concentración de metales y tasas de carga de acuerdo con la Regla 503 de la EPA.

Tabla 2

Concentración de metales y tasas de carga según la regulación 503 de la EPA

Elementos	Valores límite (mg/kg materia seca)	Tasa de carga acumulativo del elemento, (kg/ha)	Concentración del componente para una calidad excepcional, (mg/kg)	Tasa de carga anual del elemento
Arsénico	75	41	41	2.0
Cadmio	85	39	39	1.9
Cromo	-	-	-	-
Cobre	4300	1500	1500	75
Plomo	840	300	300	15
Mercurio	57	17	17	0.85
Molibdeno	75	-	-	-
Níquel	420	420	420	21
Selenio	100	100	100	0.5
Zinc				

Nota. Adaptado de Agencia et al. (2002).

En la siguiente tabla 3 se muestran los tipos de lodos según su calidad microbiológica correspondiente. Los lodos de buena calidad se clasifican como lodos Clase A o lodos Clase B.

Tabla 3*Límite de calidad microbiológica de lodos*

PARÁMETRO	LODO CLASE A	LODO CLASE B
Coliformes	<1000 NMP/100 mL o UFC/g	<2000000 NMP/100 mL o UFC/g
Fecales o salmonella	<3 NMP/4g	
Huevos de helminto	1 huevo viable/4g	-

Nota. Adaptado de Agencia et al. (2002).

2.2.6. Mecanismos para el manejo y operación de lodos de la PTAR de San

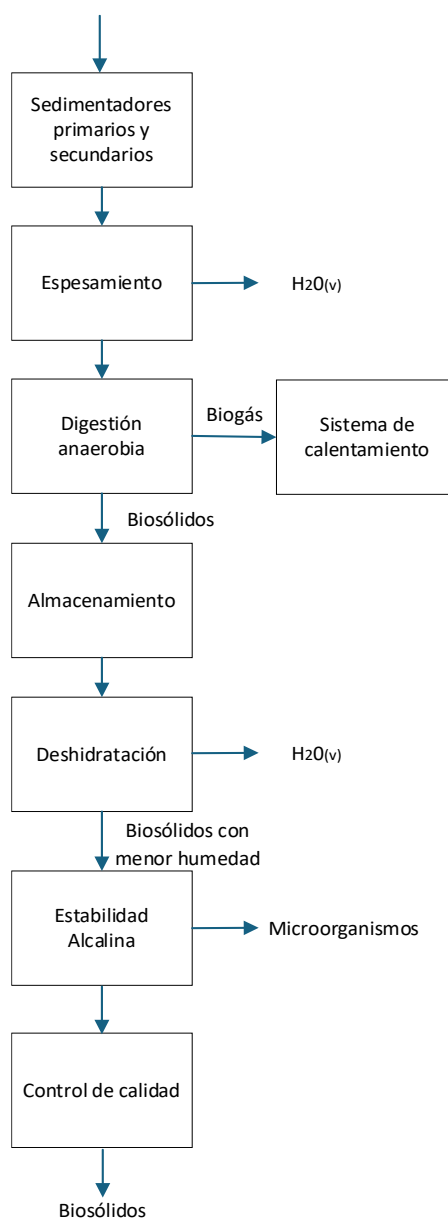
Jerónimo-Cusco

Durante el proceso de depuración de aguas residuales se genera un lodo con un alto contenido de materia orgánica. Una vez sometido a las etapas correspondientes de tratamiento, este material puede convertirse en un insumo adecuado para la producción de fertilizantes, debido a su aporte significativo de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, elementos esenciales para la productividad agrícola local (EPS SEDACUSCO S.A., 2022).

En la figura N°1 se observa los mecanismos para el manejo y operación de los lodos provenientes de la PTAR de San Jeronimo, Cusco. Este mecanismo se relaiza con el objetivo de tratar y estabilizar los lodos generados en el proceso de depuracion para producir biosolidos seguros y con valor agricola.

Figura 1

Manejo y Operación de lodos de la PTAR de San Jerónimo, Cusco



Nota. Adaptado de (EPS SEDACUSCO S.A., 2022).

2.2.7. Biosólidos

Son residuos orgánicos que derivan del tratamiento de aguas residuales comerciales, domésticas, industriales y municipales. Los biosólidos son sustancias orgánicas formadas durante el tratamiento de aguas residuales y que se pueden utilizar y aplicar en campos agrícolas, bosques y tierras que requieren remediación. Los biosólidos, también conocidos como lodos estabilizados, son el resultado de un proceso riguroso que

elimina patógenos y contaminantes, convirtiéndolos en un producto seguro y beneficioso para el medio ambiente y la salud pública (Agencia et al., 2002).

Los términos lodo y biosólidos se suelen confundir. Las principales diferencias están en su nivel de fermentación, la concentración y la patogenicidad, lográndose reducir el nivel de riesgo y peligrosidad para su reutilización (Montes & Menéndez, 2010).

En la tabla 4 se muestra la diferencia de composición entre un lodo crudo y un biosólido o lodo digerido.

Tabla 4

Diferencia en la composición de un lodo crudo y un biosólido

Parámetro	Unidades	Lodos Crudos	Lodos Digeridos o biosólidos
pH	unidades	5-8	6.5-7.5
Alcalinidad	mg/L de CaSO ₃	500-1500	2500-3500
Nitrógeno	% de ST	1.5-4	1.6-6
Fosforo	P ₂ O 5% de ST	0.8-2.8	1.5-4
Grasas y acetites	% de ST	6-30	5-20
Proteínas	% de ST	20-30	15-20
Ácidos orgánicos	mg/l Hac	6800-10000	2700-6800
Sólidos totales	%	2-8	6-12
Sólidos volátiles	% de ST	60-80	30-60
ST: Sólidos totales, Hac: Ácido acético.			

Nota. Adaptado de Ramón (2005).

2.2.8. Tipos de biosólidos

Según la normativa peruana, que aprueba el Reglamento para el reaprovechamiento de los lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, los biosólidos se clasifican en:

Clase A: Son aquellos que poseen patógenos mínimos antes de su aplicación al suelo o distribución pública (D.S. 015-2017-VIVIENDA, 2017).

Clase B: Son aquellos que poseen patógenos. Este tipo de biosólidos han sido tratados para reducir, pero no eliminar todos los patógenos. Los biosólidos clase B requieren de ciertos procedimientos adicionales para su aplicación al suelo, estos procedimientos permiten la reducción de patógenos (D.S. 015-2017-VIVIENDA, 2017)

2.2.9. Aprovechamiento de los biosólidos

Es la utilización de los biosólidos como fertilizante y abono de suelos, porque contienen gran cantidad de materia orgánica y nutrientes (Oropeza, 2006).

El aprovechamiento de biomasa depende de los tipos (según el contenido de metales pesados) y clase (según el contenido de patógenos y parásitos) como se muestra en la tabla 5, y humedad relativa hasta 85% como máximo (Agencia et al., 2002).

Tabla 5

Aprovechamiento de Biosólidos

TIPO	CLASE	APROVECHAMIENTO
Excelente	A	• Usos urbanos con contacto público directo durante sus aplicaciones. • Los establecidos para clase B y C.
Excelente o bueno	B	• Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación. • Los establecidos para la clase C.
Excelente o bueno	C	• Usos forestales. • Mejoramiento de suelos. • Usos agrícolas.

Nota. Adaptado de Castañeda & López (2012).

2.2.10. Características de los biosólidos

Según Oropeza (2006), las propiedades y características de los lodos resultan de la utilización del agua y de los sucesivos procesos de limpieza a los que se somete, así como del tratamiento realizado para estabilizar los lodos.

a) Características físicas

Los lodos primarios y secundarios son como un líquido que contiene partículas heterogéneas en suspensión. En lodos frescos, su volumen es del 0,05-0,5% del volumen de agua tratada, en lodos activados y otros procedimientos biológicos es un poco menor. Los parámetros físicos más importantes son: el contenido de materia volátil, contenido de materia seca, contenido de agua intersticial, viscosidad, carga específica, resistividad, compresibilidad y calor calorífico (Manahan, 2007).

b) Características químicas

La composición química de los biosólidos varía según su origen y método de tratamiento. Según Oropeza (2006), los parámetros químicos más importantes son:

- **Materia orgánica:** Representa entre el 60 y el 85% de la materia seca.
- **Nutrientes:** Incluye el nitrógeno, fósforo y potasio, que son vitales para el crecimiento de las plantas.
- **Micro contaminantes orgánicos:** Estas sustancias pueden afectar negativamente el procesamiento de lodos y su uso agrícola. Se encuentran en aguas residuales domésticas e industriales, siendo comunes los productos de limpieza y medicamentos, como antibióticos.
- **Micro contaminantes minerales:** Contienen sustancias como Fe, Cu, Mn, Zn, que son beneficiosas, y otros como Pb, Cd, Hg y Ni, que son perjudiciales. Es vital conocer el contenido mineral del lodo antes de usarlo en agricultura.

c) Características biológicas

Las aguas residuales contienen diversas especies de flora y fauna, especialmente en los sedimentos. Según Martínez (2012), los principales organismos presentes en los lodos son:

- **Bacterias:** Hay distintos tipos, algunas son excretas y otras pueden ser patógenas, clasificándose en aerobias estrictas, aerobias facultativas, anaerobias estrictas y anaerobias facultativas.

- **Virus y parásitos:** Los sólidos del lodo pueden absorber enterovirus, adenovirus y reovirus. Muchos parásitos son telúricos o fecales y su eliminación es difícil porque pueden adoptar formas resistentes.
- **Hongos y Algas:** Los hongos son principalmente levaduras y no suelen ser patógenos. Las algas son escasas en lodos primarios y secundarios.
- **Macrofauna:** Contiene lombrices, larvas de insectos, crustáceos y pequeñas arañas.

2.2.11. Alternativas de manejo de biosólidos

1. Incineración

La incineración de biosólidos con o sin recuperación de energía ofrece varios beneficios y ventajas. Se encuentran disponibles varias tecnologías de hogar y lecho fluidizado para quemar biosólidos, siendo esta última la más común. La incineración reduce los biosólidos en aproximadamente un 70% y produce la degradación térmica de patógenos y sustancias orgánicas tóxicas. La composición y el poder calorífico de los biosólidos son las características más relevantes para estimar el equilibrio térmico de los biosólidos en combustión. El poder calorífico inferior de los lodos es, al igual que el del lignito, de 13.1-17.0 MJ/kg. Sin embargo, la incineración es una opción costosa debido al requerimiento de energía externa asociado con el secado. La incineración debe cumplir con las normas sobre contaminación del aire (Oropeza, 2006).

2. Vertedero

El vertido de biosólidos en vertederos ha sido una práctica común para reducir costos, pero está cada vez más restringido en varios países. Según las Directivas 75/442/CEE y 91/156/CEE, el vertedero es la alternativa menos deseable para la eliminación de biosólidos. El objetivo del vertedero es reducir la cantidad de residuos domésticos biodegradables al 35 por ciento. La gran cantidad de materia orgánica contenida en los biosólidos favorece la liberación de metano de los vertederos y las aguas residuales. Por lo tanto, el vertedero también enfrenta una creciente oposición pública a estas cuestiones ambientales (Oropeza, 2006).

3. Pirólisis

Es un procedimiento que se utiliza para el manejo de biosólidos. La pirólisis tiene como ventaja que los gases de combustión son menos controlables en comparación con

la combustión. Al mismo tiempo, disminuye la cantidad de gases ácidos y dioxinas producidas. La pirólisis se puede dividir en términos generales en pirólisis lenta y pirólisis rápida (Sanchez et al., 2023).

- **La pirólisis lenta:** funciona con largos tiempos de residencia y bajas velocidades de calentamiento, maximiza la fracción sólida (biocarbón o carbón activado) a expensas del producto energético (biopetróleo) (Sanchez et al., 2023).
- **La pirólisis rápida:** realiza una conversión termoquímica a una velocidad de calentamiento rápida (aproximadamente 100 °C/min) que maximiza el líquido y fracciones de gas. La pirólisis puede dar un mayor rendimiento y un mayor contenido de hidrógeno (Sanchez et al., 2023).

El aumento de la temperatura de pirólisis maximiza el rendimiento de la fracción gaseosa y reduce la cantidad de la fracción sólida manteniendo constante la fracción líquida. La velocidad de calentamiento es un parámetro importante, pero sólo por debajo de 650 °C. Por lo tanto, al aumentar este parámetro, la composición de los aceites de pirólisis cambia a compuestos más ligeros como resultado del craqueo (Urien, 2013).

2.2.12. Proceso de Pirólisis en Biosólidos

Este proceso es ligeramente endotérmico y representa el primer paso en cualquier conversión termoquímica (Syed-Hassan et al., 2017). La pirólisis genera productos sólidos (carbonización), líquidos (bioaceite) y gaseosos. Se considera que esta tecnología es menos contaminante que la combustión debido a las temperaturas más bajas y la falta de oxígeno, lo que disminuye la formación de furanos y dioxinas (Conesa et al., 2009).

Investigaciones previas han mostrado que no se liberan minerales durante la pirólisis de biosólidos a temperaturas por debajo de 1200 °C (Storm et al., 2016). Sin embargo, metales como el arsénico, el cadmio y el mercurio pueden volatilizarse a temperaturas superiores a 600 °C, mientras que el zinc se volatiliza a temperaturas superiores a 800 °C. Esto sugiere que es posible encontrar trazas de estos elementos en el material cuando la pirólisis se realiza a altas temperaturas en la producción de bioaceite o condensado (Inguanzo et al., 2002).

La distribución de los productos de pirólisis está influenciada por las propiedades de los biosólidos y las condiciones de operación, como la temperatura final, el tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento y la presión. Una alta velocidad de

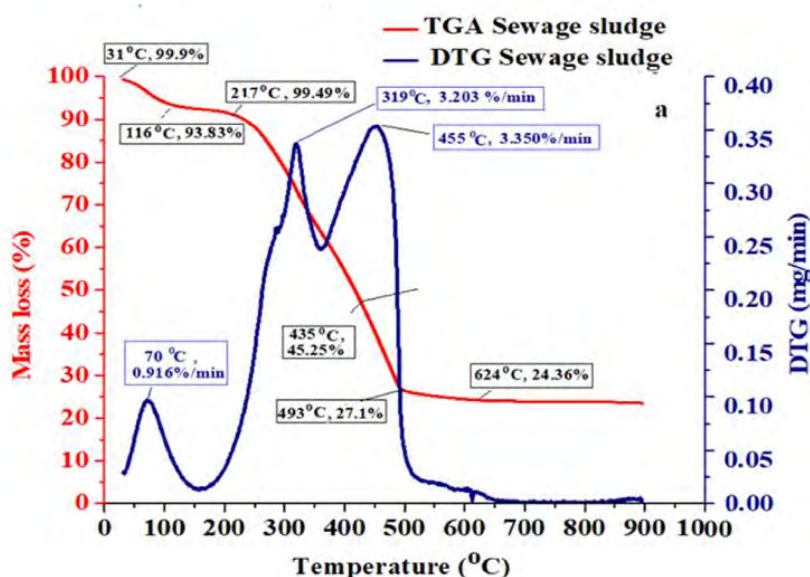
calentamiento, una temperatura moderada, un tiempo de residencia breve y un enfriamiento rápido del vapor favorecen la producción de bioaceite. Las altas temperaturas promueven la descomposición de fases volátiles condensables en gases ligeros y aumentan la formación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Además, un tamaño de partícula más pequeño es beneficioso para la producción de bioaceite, ya que permite un calentamiento más rápido y uniforme, reduciendo los efectos negativos de la transferencia de masa entre partículas (Samolada & Zabaniotou, 2014).

➤ **Análisis termogravimétrico de los Biosólidos**

De acuerdo con Aragonez (2015), la termogravimetría es una técnica que consiste en registrar los cambios de masa de un material cuando éste se somete a un proceso de calentamiento. La temperatura puede aumentar de forma continua o mantenerse en intervalos fijos. En ambos casos, las mediciones de masa, temperatura y/o tiempo se realizan de manera continua (figura 2).

Figura 2

Análisis termogravimétrico de lodos de depuradora



Nota. Adaptado de (Ghodke et al., 2021).

- **ASTM D7582:** Métodos de prueba estándar para el análisis proximal de carbón y coque mediante análisis macro termogravimétrico

Define un método estandarizado de análisis próximo mediante macro-termogravimétrico, para determinar humedad, volátiles, cenizas y carbono fijo en combustibles sólidos como carbón y coque. Este análisis es fundamental para conocer el valor energético y las propiedades de combustión de combustibles sólidos como carbón, coque e incluso biomasa y biosólidos (ASTM, 2015).

- **ASTM E873:** Método de ensayo estándar para la densidad aparente de combustibles de biomasa de partículas densificadas

Este estándar establece un método de ensayo para determinar la densidad aparente de biocombustibles sólidos densificados en forma de partículas, tales como: pellets, briquetas, cubos u otras formas compactadas (ASTM, 2019b).

2.2.13. Tipos de pirólisis

De acuerdo con Fernández (2020), químicamente, la pirólisis es un proceso complejo que implica una serie de reacciones influenciadas por diversos factores. Entre estos se encuentran la estructura y composición de las materias primas, la tecnología empleada, las velocidades de calentamiento, los tiempos de residencia, las velocidades de enfriamiento y las temperaturas aplicadas durante el proceso.

El proceso de pirólisis puede ser endotérmico o exotérmico, dependiendo de la temperatura del sistema de reacción. En el caso de muchas biomásas con alto contenido de oxígeno en su fracción de celulosa, la pirólisis es endotérmica a temperaturas bajas y exotérmica a temperaturas elevadas. A bajas temperaturas, la descomposición térmica de estos materiales está principalmente controlada por reacciones químicas, mientras que a altas temperaturas predominan los procesos de transferencia de masa y calor (Rodríguez, 2019).

a) Pirólisis al Vacío

Los materiales orgánicos se calientan en un vacío para bajar sus puntos de ebullición y evitar reacciones químicas no deseadas. Esto genera un gas que resiste térmicamente el proceso de pirólisis, y el líquido obtenido puede usarse solo o mezclado con otros combustibles en turbinas de gas o calderas. Este proceso se puede realizar en un reactor de lecho fijo, donde el calor se transfiere mediante el contacto con las superficies (J. M. Martínez & Lora, 2015).

La pirólisis al vacío es una técnica antigua que facilita la obtención de grandes volúmenes de líquidos de pirólisis a partir de materiales orgánicos. La aplicación del vacío reduce significativamente las reacciones secundarias, tales como el craqueo térmico, la repolimerización, la recondensación, las colisiones en fase gaseosa, el craqueo catalítico y las reacciones de oxidación o reducción. Cuando los vapores generados se enfrían rápidamente, se favorece la producción de líquidos orgánicos, como los aceites de pirólisis, en detrimento de la formación de gases y residuos sólidos (Pretell et al., 2021).

Tabla 6

Tipos de Pirolisis

Proceso	Tiempo de Residencia	Velocidad de Calentamiento	Temperatura (°C)	Productos
Carbonización	Días	Muy lenta	400	Bio-char
Convencional	5-30 min	Lenta	600	Gas, líquido y biochar
Rápida	0,5-5 seg	Muy rápida	650	Bioaceites
Flash (Líquidos)	< 1 seg	Rápida	< 650	Bioaceites
Flash (Gas)	< 1 seg	Rápida	< 651	Químicos y gas
Ultrarápida	< 0,5 seg	Muy rápida	1000	Químicos y gas
Vacío	2-30 seg	Media	400	Bioaceites
Hidropirólisis	< 10 seg	Rápida	< 500	Bioaceites
Metanopirólisis	< 10 seg	Rápida	> 700	Químicos

Nota. Adaptado de Balat et al., (2009)

➤ **Productos de la Pirólisis de Biosólidos**

Las condiciones operativas de la pirólisis, como la temperatura, la velocidad de calentamiento y la presión, junto con las características de la materia prima (composición química, contenido y naturaleza de las cenizas, tamaño y forma de las partículas, densidad y nivel de humedad), determinan la cinética de reacción, la distribución, la composición y las propiedades de los productos resultantes. Este método se emplea de manera extensa en el aprovechamiento de biomasa (madera, residuos agroindustriales, entre otros), y en los últimos años su aplicación al tratamiento de biosólidos ha cobrado mayor relevancia,

especialmente en Europa y Estados Unidos, impulsada por el fortalecimiento de las regulaciones ambientales en la gestión de residuos sólidos (Mendoza G., 2016b).

Los principales productos obtenidos de la pirólisis de biosólidos son los siguientes:

1. Aceites pirolíticos

Estos líquidos están formados por alquitranes (aceites de alto peso molecular) y por aceites de bajo peso molecular que incluyen compuestos como acetona, ácido acético, metanol y agua. Los productos líquidos, también conocidos como bioaceites, corresponden a sustancias volátiles condensables que se caracterizan por su elevado punto de ebullición, alta viscosidad y una composición compleja de compuestos orgánicos de diferente tamaño molecular, originados a partir de procesos de despolimerización y fragmentación de los principales constituyentes de la biomasa (Mendoza G., 2016b).

El bio-oil es un líquido orgánico con un elevado contenido de oxígeno, de tonalidad marrón oscuro o negro y presenta alrededor de un 25% de agua. Su composición varía en función del tipo de biomasa empleada y de las condiciones del proceso aplicado. A este producto líquido se le asocian varios términos, tales como: alquitrán o alquitrán pirolítico, bio aceite, biocrudo, madera líquida, humo líquido, aceite de biocombustible, destilados de madera, aceite de pirólisis, ácidos pirolíticos etc, (Fernández, 2020).

Los estudios revelaron que un alto contenido de materiales inorgánicos afecta significativamente el rendimiento de los productos líquidos de tres formas: primero, reduce la producción de bioaceite en relación con la masa de biosólidos; segundo, disminuye el contenido de cenizas en la fase sólida; y tercero, inhibe la descomposición de la materia orgánica debido a la presencia de óxidos metálicos como CaO, Fe₂O₃ y ZnO, mientras que promueve reacciones secundarias de sustancias volátiles debido a altas concentraciones de metales de transición (especialmente Fe) y metales alcalinos y alcalinotérreos (principalmente K, Mg, Ca), (Syed-Hassan et al., 2017).

El bio aceite producido por pirólisis contiene agua, hidrocarburos (alifáticos y aromáticos), hidrocarburos con oxígeno (como fenoles, cetonas, alcoholes, azúcares, ácidos) y compuestos con nitrógeno (como aminas, piridinas, pirazinas). Los bioaceites provenientes de biosólidos tienen un pH básico, que varía entre 5.1 y 8.5, debido a la

presencia de fenoles, amoníaco y compuestos nitrogenados. En contraste, los aceites orgánicos de biomasa tienen un pH alrededor de 2.5, lo que minimiza los problemas de corrosión en las plantas de tratamiento y facilita su uso en combustión. Los bioaceites de biosólidos tienen un contenido de nitrógeno mucho mayor (5.8–7.6% en masa seca) en comparación con los de biomasa (0–0.3%). Esto resulta en una mayor producción de óxidos de nitrógeno (NO_x y N₂O) durante la combustión de biosólidos, exigiendo mayores medidas técnicas para asegurar la pureza de los gases de combustión (Syed-Hassan et al., 2017). En la tabla 7 se refleja la producción en peso de líquidos con respecto a los otros productos.

Tabla 7

Rendimiento de productos líquidos obtenidos en diferentes reactores de pirólisis de biosólidos

Tipo de Reactor	Temperatura operación con mayor rendimiento de líquidos (°C)	Productos líquidos (% masa)	Residuo carbonoso / Char (% masa)	Productos gaseosos (% masa)	Referencia
Lecho cónico con canalones (pirólisis rápida)	~500 °C	~48–49 %	~30–35 % (mayor a baja T)	~20–25 % (mayor a alta T)	(Oladejo et al., 2019)
Pirólisis rápida/flash (general) – tipos rápidos (reactores fluidizados, arrastrados, ablativos)	500–550 °C	~60–80 %	~15–25 %	~10–20 %	(Mackey & Al-ansari, 2022)
Pirólisis rápida– estimación general	~450–600 °C	~60–75 %	~15–20 %	~10–20 %	(Mackey & Al-ansari, 2022)
Lecho fluidizado (lodos de depuradora específico)	~450–500 °C	~50–52 % (máx. reportado)	~20–30 % estimado	~20–30 % estimado	(Ordóñez, 2019)

- **ASTM D240: Determinación del Calor de Combustión de Combustibles Líquidos de Hidrocarburos**

Establece el procedimiento estandarizado para determinar el calor de combustión (también llamado poder calorífico) de combustibles líquidos a base de hidrocarburos, utilizando una bomba calorimétrica. Bajo condiciones habituales, este método de ensayo puede aplicarse de manera directa a combustibles como gasolinas, querosenos, fuelóleos N.º 1 y N.º 2, diésel N.º 1-D y N.º 2-D, así como a combustibles para turbinas de gas en sus clasificaciones N.º 0-GT, 1-GT y 2-GT (ASTM, 2019a).

- **ASTM D445: Viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos (y cálculo de la viscosidad dinámica)**

Este método establece el procedimiento para determinar la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos, midiendo el tiempo que tarda un volumen conocido de líquido en fluir bajo la acción de la gravedad a través de un viscosímetro capilar calibrado (ASTM, 2024).

- **ASTM D95 (Adaptado): Método de Ensayo Estándar para la Detección de Agua en Productos Petrolíferos y Materiales Bituminosos por Destilación**

La cual establece el procedimiento para cuantificar agua en productos derivados del petróleo y materiales bituminosos mediante destilación con solvente (ASTM, 2018a).

- **ASTM D93: Punto de inflamación mediante el probador de copa cerrada Pensky-Martens**

El método se basa en determinar la temperatura mínima a la cual los vapores generados por un líquido forman una mezcla inflamable con el aire dentro de un recipiente cerrado. Estos métodos de ensayo deben utilizarse para medir y describir las propiedades de materiales, productos o conjuntos en respuesta al calor y a una fuente de ignición en condiciones controladas de laboratorio (ASTM, 2019c).

- **ASTM D97: Método de prueba estándar para el punto de fluidez de productos derivados del petróleo**

El punto de fluidez se define como la temperatura más baja a la cual se observa movimiento del líquido. La temperatura reportada corresponde generalmente a 3 °C por encima del punto donde ya no se detecta flujo. El método se basa en enfriar progresivamente una muestra del líquido bajo condiciones estandarizadas y observar periódicamente su capacidad de movimiento (ASTM, 2018b).

- **ASTM D86: Destilación de productos petrolíferos y combustibles líquidos a presión atmosférica**

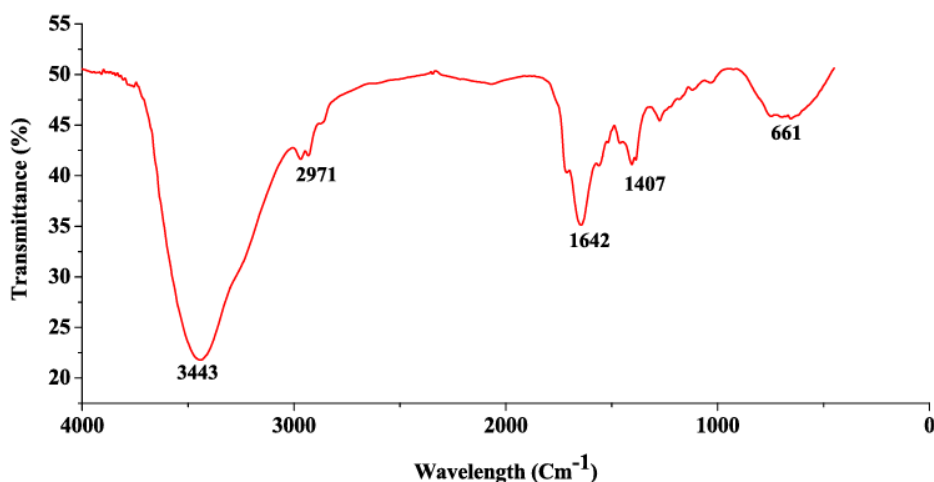
Este método de ensayo abarca la destilación atmosférica de combustibles líquidos y productos petrolíferos, empleando una unidad de destilación por lotes de laboratorio para determinar de forma cuantitativa el rango de ebullición. Es aplicable a una amplia variedad de productos, incluidos destilados ligeros y medios, gasolinas automotrices con o sin oxigenados, gasolinas de aviación, combustibles para turbinas de aviación, diésel, mezclas con biodiésel de hasta un 30 % en volumen. Las propiedades de destilación o volatilidad de los hidrocarburos influyen directamente en su seguridad y desempeño, en particular en combustibles y disolventes. El rango de ebullición permite conocer la composición y el comportamiento del combustible tanto en almacenamiento como en uso, mientras que la volatilidad define principalmente su capacidad de generar vapores con riesgo explosivo (ASTM, 2023).

- **Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)**

El análisis mediante FTIR se aplica en diversas investigaciones para la caracterización de los bioaceites generados en la pirólisis de distintas biomásas como se muestra en la figura 3. Asimismo, puede emplearse en la evaluación de los productos sólidos (biocarbón) y de los gases no condensables. Generalmente, esta técnica se utiliza con un enfoque cualitativo, permitiendo identificar los grupos funcionales presentes en las mezclas que conforman los productos de pirólisis (Meza Mejía et al., 2025).

Figura 3

Análisis FTIR de los líquidos de pirólisis



Nota. El análisis FTIR del bioaceite de pirólisis de lodos de depuradora (SS) mostró bandas características en 3443, 2971, 1642, 1407 y 661 cm⁻¹. La absorción entre 3500–3300 cm⁻¹ se asocia a estiramientos –OH y –NH, evidenciando la presencia de alcoholes, ácidos carboxílicos, fenoles, aminas y amidas. Las señales en 2900–2850 cm⁻¹ corresponden a vibraciones de C–H alifáticos, indicando alcanos. Entre 1690–1575 cm⁻¹ se observan grupos con dobles enlaces, como aminas, amidas y compuestos azo. Finalmente, la región 1470–1365 cm⁻¹ refleja deformaciones C–H de grupos metilo, propios de alcanos ramificados como gem-dimetilo y terc-butilo. Adaptado de (Ghodke et al., 2021).

2. Carbón pirolítico

Se encuentra conformado por materiales que no han sufrido transformación o que provienen de procesos de condensación molecular. Esta fracción presenta un alto contenido de carbono, acompañado de componentes inertes propios de los residuos (Fernández, 2020).

La proporción de sólidos puede variar entre el 35% y el 80% respecto a la masa seca de los biosólidos (Fonts et al., 2012). Las posibles aplicaciones del carbono biosólido incluyen usos agrícolas, remediación de suelos y como material de adsorción. Se ha

demostrado que aplicar carbono biosólido a los suelos aumenta la disponibilidad de fósforo y nitrógeno (Mendoza et al., 2019).

Ábrego et al. (2008), informaron un valor de superficie Brunauer-Emmett-Teller (BET) de 124 m²/g para el carbón obtenido de la pirólisis de biosólidos a altas temperaturas. Esto se debe a las reacciones de gasificación generadas por la descomposición de carbonatos (CaCO₃) y las reacciones con sulfuros de hierro en las cenizas. El alto contenido de cenizas en el carbón de biosólidos confiere propiedades catalíticas que pueden ser aprovechadas en procesos para eliminar NO_x y H₂S. Otra posible aplicación de este producto es la recuperación de elementos valiosos como fósforo y potasio (Samolada & Zabaniotou, 2014).

3. Gases de pirólisis

El gas generado durante la pirólisis de biosólidos tiene una composición similar al gas producido por la pirólisis de materiales lignocelulósicos, y está compuesto principalmente por CO, CO₂, H₂ y CH₄, con hidrocarburos ligeros (hasta C₄) presentes en menores cantidades. Las concentraciones de estos gases varían según la temperatura final de pirólisis, la velocidad de calentamiento y el contenido de agua de los biosólidos. Las concentraciones típicas son del 15% al 40% para H₂, del 20% al 40% para CO, del 10% al 15% para CO₂ y del 5% al 15% para CH₄, mientras que los hidrocarburos ligeros constituyen menos del 5% en volumen.

El poder calorífico y la composición del gas obtenido en la pirólisis de biosólidos dependen directamente de las condiciones operativas y del tipo de biosólido utilizado. En Colombia, investigaciones realizadas mediante análisis termogravimétrico han evidenciado que el poder calorífico de esta fracción gaseosa oscila entre 15 y 17 MJ/kg (Mendoza G., 2016b).

Se está explorando la producción de gases ricos en hidrógeno a partir de la pirólisis de biosólidos húmedos. El elevado contenido de humedad (73-84%) en los biosólidos crea una atmósfera rica en vapor dentro del reactor, lo que favorece la reacción de reformado con vapor de los compuestos volátiles y la gasificación parcial del carbón. Ambos procesos contribuyen a aumentar el rendimiento de las fracciones de gas (Mendoza et al., 2019).

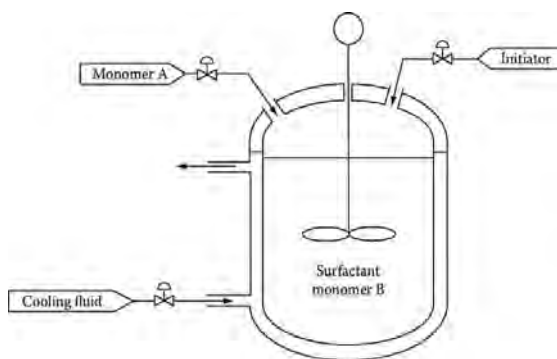
2.2.14. Tipos de Reactores de Pirólisis

Se han realizado un gran número de estudios tanto sobre pirólisis térmica como sobre pirólisis catalítica utilizando diferentes tipos de reactores. Se determinó que la caracterización variaba según múltiples factores, como el tiempo de permanencia, el tipo de interacción entre las muestras en degradación (directa o indirecta), el catalizador empleado y la velocidad de la reacción. Esto influirá más o menos en los resultados obtenidos, haciendo mucho más difícil comparar objetivamente los resultados de cada estudio (Obando, 2015).

1. **Reactores Semicontinuos (Semibatch):** En este sistema, uno o más reactivos se cargan inicialmente en el reactor y durante la reacción se adiciona o retira otra corriente de forma controlada, mientras que el producto generalmente se mantiene dentro del reactor hasta finalizar el proceso. Este tipo de reactor se utiliza cuando es necesario controlar la velocidad de reacción, la liberación de calor o la formación de subproductos, siendo común en procesos de polimerización, fermentación y reacciones altamente exotérmicas (Figura 4), (Rodríguez, 2019).

Figura 4

Reactor de Semibatch.



Nota. Adaptado de J. García et al. (2024)

2.2.15. Rendimiento de la materia de biosólidos

El análisis del rendimiento de la materia de biosólidos, se refiere a la proporción de material útil o recuperado después de un proceso físico, químico o térmico aplicado a la muestra. Este indicador es fundamental para evaluar la eficiencia del tratamiento, ya que permite cuantificar la fracción de sólidos que permanece disponible una vez

eliminada la humedad o realizados otros procesos de estabilización (Mahamud et al., 1996).

Según Mendoza et al., (2019), la fórmula básica para determinar el rendimiento de la materia de sólidos totales (biosólidos) en una muestra es el cociente entre el peso seco del residuo y el peso total de la muestra húmeda, expresado en porcentaje:

$$\text{Rendimiento (\%)} = \left(\frac{\text{Peso Seco (Kg)}}{\text{Peso Húmedo (Kg)}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

- Peso Húmedo: Masa de la muestra tal como se toma.
- Peso Seco: Masa restante tras evaporar el agua en un horno.

2.3. Marco Conceptual

2.3.1. Temperatura (°C)

Este es el parámetro más importante en el proceso de pirólisis, favoreciendo la ruptura de los enlaces químicos de las moléculas más complejas, dando como resultado moléculas más pequeñas (Ordóñez, 2019).

El aumento de este parámetro maximiza el rendimiento de la fracción gaseosa y minimiza la cantidad de la fracción sólida, y mantiene constante la fracción líquida (Sanchez et al., 2023).

2.3.2. Tamaño de partícula (mm)

El tamaño de partícula depende de la temperatura, es decir, la temperatura de las partículas más pequeñas es más uniforme en el proceso de pirólisis, mientras que la temperatura de las partículas más grandes es menos uniforme y por lo tanto la pirólisis ocurre a una temperatura más baja (Sanchez et al., 2023).

El tamaño de las partículas utilizadas en el proceso de pirólisis debe ser pequeño para facilitar el proceso de conversión.

2.3.3. Rendimiento de productos líquidos

Este parámetro es la cantidad de producto líquido que se obtiene en el proceso de pirólisis, este producto líquido viene a ser la producción de aceite, en comparación con

los otros dos productos (sólido y gases de pirólisis) en porcentaje en masa (% m/m), el cual se obtendrá a través del proceso de balance de materia (Mendoza et al., 2019).

Según Bridgwater (2012), para determinar el rendimiento del combustible líquido obtenido se utilizará la siguiente ecuación básica:

$$\%R(Xi) = \frac{x_i}{y_i} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

- x_i : gramos líquidos.
- y_i : gramos materia prima alimentada.
- $R(Xi)$: adimensional.

2.3.4. Características fisicoquímicas de productos líquidos

Son las propiedades que describen su comportamiento, composición y estructura fisicoquímica, las cuales son:

- **Densidad:** Permite identificar la naturaleza del combustible y su comportamiento en almacenamiento y transporte. En bioaceites, valores altos indican la presencia de compuestos pesados y oxigenados (Speight, 2006).
- **Viscosidad cinemática:** Es una propiedad clave para el manejo, bombeo y atomización en sistemas de combustión. Altas viscosidades dificultan su uso directo como combustible (ASTM, 2024).
- **Contenido de agua:** Una cantidad significativa de agua influye negativamente en el poder calorífico, estabilidad y calidad del combustible, además de favorecer la formación de emulsiones (Bridgwater, 2012).
- **Poder calorífico:** Es un parámetro fundamental para evaluar su potencial energético. Valores bajos en bioaceites se asocian a alto contenido de oxígeno y agua (Speight, 2006).
- **Punto de inflamación:** Es la temperatura mínima a la cual el combustible emite vapores suficientes para formar una mezcla inflamable con el aire. Es un indicador de seguridad en almacenamiento y transporte (Speight, 2006).
- **Punto de fluidez:** Es la temperatura más baja a la cual el fluido puede fluir. Determina su comportamiento a bajas temperaturas y su facilidad de manejo en condiciones ambientales adversas (Speight, 2006).

- **Destilación (ASTM D86):** Permite determinar el rango de ebullición del producto, proporcionando información sobre su composición y volatilidad. Es útil para evaluar la presencia de fracciones ligeras y pesadas (Speight, 2006).
- **Gravedad API:** Permite clasificar el tipo de fluido (ligero o pesado). Valores bajos indican fluidos pesados, como en el caso de bioaceites (Speight, 2006).

Estas características son fundamentales para evaluar la calidad y el potencial de uso de un biocombustible y optimizar procesos de producción, almacenamiento y uso de biocombustibles (Alarcón & Viltres 2022).

➤ **Software DWSIM**

El software DWSIM es un simulador de procesos químicos de código abierto que permite modelar sistemas termodinámicos y operaciones unitarias mediante ecuaciones de estado y modelos de propiedades. Este simulador DWSIM se utiliza para estimar propiedades fisicoquímicas de bioaceites a partir de datos experimentales como la curva de destilación ASTM D86 y la gravedad API. El software permite calcular propiedades como presión de vapor, viscosidad, punto de inflamación, punto de fluidez, índice de cetano etc, (Ramos, Nahui-ortiz, et al., 2023).

El uso de DWSIM permite complementar resultados experimentales mediante simulación, proporcionando una aproximación del comportamiento termodinámico del bioaceite. Sin embargo, debido a la naturaleza compleja del bioaceite, los resultados deben considerarse como estimaciones teóricas.

2.4. Enfoque, tipo y alcance de la investigación

El objetivo de la investigación fue evaluar el rendimiento y las características fisicoquímicas del producto líquido obtenido a partir de la pirólisis de biosólidos producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales del Cusco en la zona de San Jerónimo, donde se utilizó un enfoque cuantitativo con diseño experimental que mejor se adapte a las características de la investigación.

El tipo de investigación según su finalidad fue una investigación aplicada a escala de laboratorio, donde se resolvió un problema de la industria, cuyo objetivo fue de analizar la pirólisis como una opción tecnológica viable para mejorar el uso de los biosólidos, de

manera que estos dejen de constituir un residuo problemático y puedan convertirse en materiales con utilidad y valor agregado (Hernández et al., 2004).

La investigación tiene un alcance explicativo. Primero, se detallan las características fisicoquímicas de los biosólidos producidos en la PTAR de San Jerónimo y los productos que surgen del proceso de pirólisis. Luego, se analiza cómo los parámetros operativos elegidos afectan el rendimiento del proceso y las principales características de los productos generados (Guevara et al., 2020).

2.5. Hipótesis

2.5.1. Hipótesis General

- Se obtiene un rendimiento de entre 20 y 50 % de productos líquidos obtenidos a partir de la pirólisis de biosólidos, lo que depende significativamente de las condiciones de operación, especialmente de la temperatura del proceso.

2.5.2. Hipótesis Específica

- Los biosólidos generados en la PTAR de San Jerónimo presentan una composición fisicoquímica y biológica adecuada para ser utilizados como materia prima en procesos termoquímicos de valorización, como la pirólisis.
- El efecto de la temperatura es directamente proporcional al rendimiento de los productos líquidos obtenidos mediante el proceso de pirólisis, hasta un punto en el cual se incrementa la producción de la fracción líquida.
- Los productos líquidos obtenidos a mayor rendimiento del proceso de pirólisis presentan características fisicoquímicas (como densidad, poder calorífico, y viscosidad) lo que demuestra su potencial para ser procesados y usarse como fuente alternativa de energía.

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Población y muestra

3.1.1. Población de investigación

La población de estudio fueron los biosólidos producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales, que fueron recolectados y debidamente preparados para el proceso de pirólisis.

3.1.2. Tamaño de muestra

En el presente trabajo de investigación se seleccionó una muestra no probabilística de 5 kg de biosólidos secos, obtenida a partir de una muestra representativa de 50 a 70 kg de biosólidos húmedos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de Cusco. La elección de esta cantidad permitió disponer de material suficiente para realizar múltiples ensayos y garantizar la reproducibilidad experimental, además de compensar posibles pérdidas durante las etapas de preparación, pretratamiento y pirólisis. Asimismo, el tamaño de la muestra resultó adecuado, facilitando el manejo, almacenamiento, secado, homogenización y manipulación segura del material durante el desarrollo de las pruebas (García et al., 2013).

3.2. Materiales, reactivos, equipos e instrumentos

a) Materiales

- Balón de destilación (250 ml).
- Vaso de precipitados (100 ml).
- Probeta (100 ml).
- Mangueras de conexión.
- Botellas de vidrio ámbar para almacenamiento de muestras.

b) Reactivos

- Tolueno de grado reactivo ACS ($\geq$ a 99.5%), solvente para determinar el contenido de agua (ASTM D95) en el producto líquido.

c) Instrumentos y Equipos

- **Balanza:** Marca “Digital Precisión” (ES-500HA) que puede leer hasta 500 g con una precisión de 0.01g.
- **Equipo de copa cerrada de Pensky-Martens:** Modelo Herzog-HFP 380
- **Probador de Punto de fluidez:** Modelo HK-3535 marca “Liaoning Huake Petroleum Apparatus Science & Technology”
- **Calorímetro de bomba de oxígeno:** Marca “Parr Instrument Company”
- **Manta calefactora:** Modelo HEAM-051-001 de la marca lbx,
- **Sensor de temperatura:** Para el monitoreo de la temperatura del reactor se utilizó una termocupla del tipo K conectada a un sensor de la marca Vernier tipo TCA-BTA, con rango de temperatura de -200°C a 1400°C.

- **Horno eléctrico:** Horno eléctrico acondicionado con rangos de temperatura de 0-1000 °C, para la lectura y control de temperatura cuenta con una termocupla (tipo K) y un sistema de automatización PID.
- **Reactor:** Se utilizó un reactor semicontinuo de acero inoxidable de 8 cm de diámetro interior y 22 cm de longitud. En la parte superior del reactor hay una tapa removible que tiene un tubo de salida para la extracción de los productos de reacción y con un orificio de 1 cm para la termocupla.
- **Sistema de enfriamiento y recolección:** Se utilizó un balón de cristal para la recolección del producto líquido sumergido en un recipiente con agua fría.
- **Sistema de vacío:** Se utilizó una bomba de vacío marca GAST (presión máxima 4.14 bar y vacío máximo 200.7 mbar).
- **Sistema de venteo de gases:** Para la ventilación de los gases a la atmósfera se realizó en la campana extractora del laboratorio donde se hizo todo el proceso de pirólisis, cuya salida está a tres metros de la zona de operación.
- **Sistema de recolección de datos:** Para el control de la temperatura del reactor se tuvo una unidad de adquisición de datos “LabQuest Mini” (Vernier), dispositivo que envía señales a través de una interfaz USB y una computadora portátil que tenga el software “Logger Pro 3”, donde se monitorean los datos.

3.3. Ámbito espacial

La investigación se desarrolló en base a los biosólidos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Seda Cusco que está ubicada en la Urb. La Collana S/N en el distrito de San Jerónimo. Las corridas experimentales se trabajaron en el laboratorio del grupo de investigación en procesos termoquímicos y energéticos de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

3.4. Diseño de la investigación

La investigación es experimental ya que se centra en evaluar el rendimiento y las características fisicoquímicas de los productos líquidos obtenidos a partir de un proceso específico (pirólisis). Una de las ventajas de la investigación experimental es que brinda a los investigadores más control sobre las variables para lograr los resultados deseados (Hernández et al., 2004).

El presente estudio se desarrolló bajo un diseño experimental unifactorial, donde se evaluó el efecto de la temperatura de pirólisis sobre el rendimiento del producto líquido obtenido a partir de biosólidos generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Jerónimo, Cusco.

La selección de los niveles de temperatura no se realizó de manera aleatoria, sino que fue definida previamente a partir de un análisis termogravimétrico (TGA), el cual permitió identificar los rangos de temperatura en los que ocurre la mayor degradación térmica de la materia orgánica presente en los biosólidos. En base a estos resultados, se establecieron cuatro niveles de temperatura: 700, 750, 800 y 850 °C, considerados representativos del proceso de pirólisis.

Para cada nivel de temperatura se realizaron tres corridas experimentales independientes, manteniendo constantes las demás condiciones operativas del proceso (masa de muestra, tiempo de residencia y atmósfera inerte). La variable de respuesta fue el rendimiento porcentual del producto líquido, calculado respecto a la masa inicial del biosólido seco.

Se propuso realizar 12 experimentos, como se ve en la siguiente tabla 8, donde se propuso trabajar con cuatro diferentes temperaturas que son (700, 750, 800 y 850 °C), para asegurar la repetibilidad se realizaron tres experimentos a cada una de las condiciones ya mencionadas. Cada experimento teniendo un tiempo de realización promedio de 10 horas teniendo en cuenta que 7 horas se dispuso para preparar y ensamblar las piezas del equipo de pirólisis hasta que culmine la corrida experimental para que el equipo se enfríe, se desarme y se limpie, y luego volver a usar en el siguiente experimento, el tiempo desde que se enciende el horno hasta que se apaga dura 3 horas para garantizar la completa descomposición térmica de los biosólidos y la adecuada liberación de compuestos volátiles (Ramos, Nahui-Ortiz, et al., 2023), la carga fue de 50 g de biosólidos por cada experimento puesto que en investigaciones sobre pirólisis de lodos residuales se realizaron corridas experimentales utilizando dicha cantidad de biomasa por ensayo, lo que permitió calcular los rendimientos de los productos obtenidos en condiciones controladas de temperatura, además en reactores de laboratorio, la masa de alimentación suele ser limitada debido al volumen reducido del reactor y a la necesidad de controlar con precisión las condiciones de operación (Punsuwan & Tangsathitkulchai, 2014).

Tabla 8*Numero de experimentos y repeticiones*

Experimento	Temperatura °C	Repeticiones
1	700	3
2	750	3
3	800	3
4	850	3
TOTAL		12

Si bien los niveles del factor fueron definidos de manera dirigida, el orden de ejecución de las corridas experimentales se realizó de forma aleatoria, con el fin de minimizar la influencia de variables externas no controladas, tales como fluctuaciones operativas del equipo o variaciones ambientales. Este enfoque permite aplicar análisis estadístico inferencial, como el análisis de varianza (ANOVA), (Montgomery, 2022), para evaluar la significancia del efecto de la temperatura sobre el rendimiento del producto líquido como se presenta en la tabla 9.

Modelo estadístico (ANOVA de un factor):

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \epsilon_{ij} \quad (3)$$

Donde:

- Y_{ij} = rendimiento del producto líquido (%).
- μ = media general.
- T_i = efecto de la i -ésima temperatura.
- ϵ_{ij} = error experimental aleatorio.

Se trabaja con un nivel de significancia:

$$\alpha = 0.05$$

Hipótesis estadística

➤ **H₀ (Hipótesis nula):**

No existen diferencias significativas en el rendimiento del producto líquido entre las temperaturas evaluadas.

➤ **H₁ (Hipótesis alternativa):**

Al menos una temperatura produce un rendimiento significativamente diferente.

Tabla 9

Análisis de Varianza (ANOVA) de un factor para el rendimiento del producto líquido

Fuente de variación	GL	SC	CM	F	p-valor
Temperatura	k-1	SC _t	CM _t	F ₀	p
Error	N-k	SC _e	CM _e		
Total	N-1	SC _{tot}			

- GL = grados de libertad.
- SC = suma de cuadrados.
- CM = cuadrado medio.
- F = estadístico de Fisher.
- p-valor = probabilidad asociada.
- k = número de tratamientos.
- N = número total de observaciones experimentales.
- F₀ = Estadístico F calculado.

Si, $p \leq 0.05$ se rechaza H₀ y se concluye que la temperatura influye significativamente en el rendimiento.

Se utilizó el software “Minitab 18” para hacer el análisis estadístico de los resultados; además de obtener el mayor rendimiento de productos líquidos. Las características físicoquímicas de materia prima y productos se realizaron en el laboratorio de normalización de petróleo y derivados (LNPD) en cumplimiento con las normas ASTM respectivas y necesarias para caracterizar el rendimiento de productos líquidos. Para la caracterización de los biosólidos se empleó la norma ASTM D7582 para el análisis próximo (humedad, materia volátil, cenizas y carbón fijo), la norma ASTM D240 para la determinación del poder calorífico y la norma ASTM E873 para la densidad aparente.

Para la caracterización del producto líquido obtenido de la pirólisis, se utilizaron las normas ASTM D445 para la viscosidad cinemática, ASTM D95 para el contenido de agua, ASTM D240 para el poder calorífico, ASTM D86 para la destilación atmosférica, ASTM D93 para el punto de inflamación y ASTM D97 para el punto de fluidez.

Los resultados y datos obtenidos para la presente investigación se representaron mediante gráficas y tablas, para darle mayor validez a la interpretación y discusión de resultados, se compararon los parámetros establecidos con los obtenidos en estudios similares como “Caracterización del bio oil obtenido por pirólisis rápida de lodos de depuradora en un reactor cónico de lecho en surtidor”, siendo la investigación más cercana a la que se propone realizar junto a otros documentos de investigación que se consideren relevantes para la elaboración de la presente tesis.

3.5. Variables y Matriz de Paralización de variables

3.5.1. Variables Independientes

- Temperatura (°C).

3.5.2. Variables Dependientes

- Rendimiento del producto líquido.

3.5.3. Variable Interviniente

- Temperatura Ambiente (°C).
- Presión Atmosférica (atm).

Tabla 10*Matriz de Operalización de Variables*

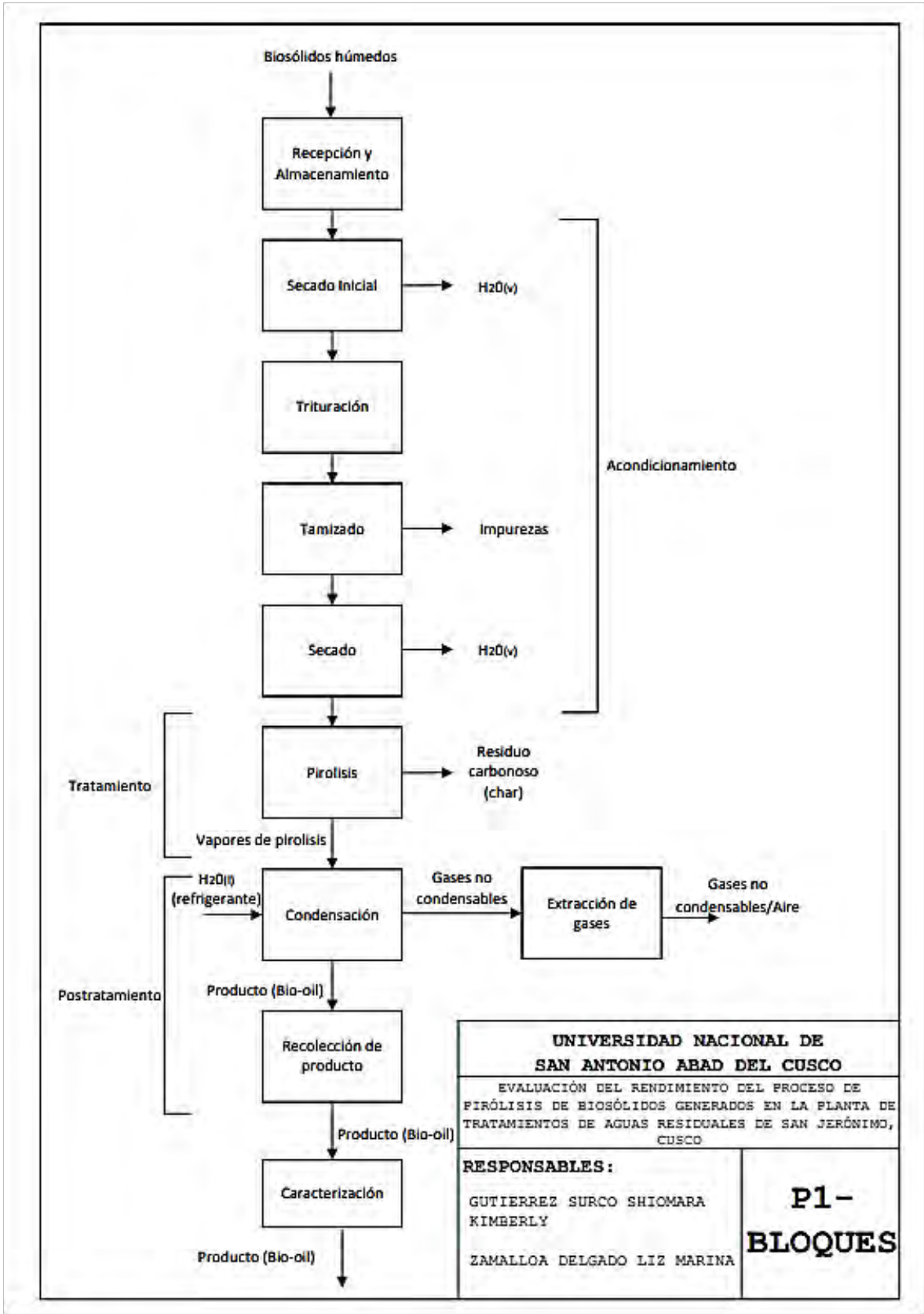
Evaluación del rendimiento del proceso de pirólisis de Biosólidos generados en la Planta de Tratamientos de Aguas Residuales de San Jerónimo, Cusco					
Variable	Tipo de Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
Temperatura	Independiente	Es una magnitud física que mide el grado o nivel de calor o frío de los cuerpos o del ambiente.	Grados centígrados que se dará al proceso de pirólisis.	°C	Rangos de temperatura establecidos para el experimento de 700-850 °C.
Rendimiento de productos líquidos	Dependiente	Es la cantidad de productos líquidos producidos, frente a otros productos.	Es la producción de aceite con respecto a los otros dos productos en porcentaje masa	% m/m	Los rangos de porcentajes de producción están entre el 20-50%
Temperatura Ambiente	Interviniente	Es la temperatura promedio de un ambiente y puede ser cualquier temperatura.	Cuantos grados centígrados está el ambiente (Lima-Perú).	°C	20-30 °C
Presión Atmosférica	Interviniente	Es la fuerza por unidad de superficie que ejerce la atmósfera en un punto específico.	Presión del entorno (Lima-Perú).	atm	1 atm

3.6. Métodos

3.6.1. Procedimientos

Figura 5

Diagrama de bloques de la pirólisis de biosólidos



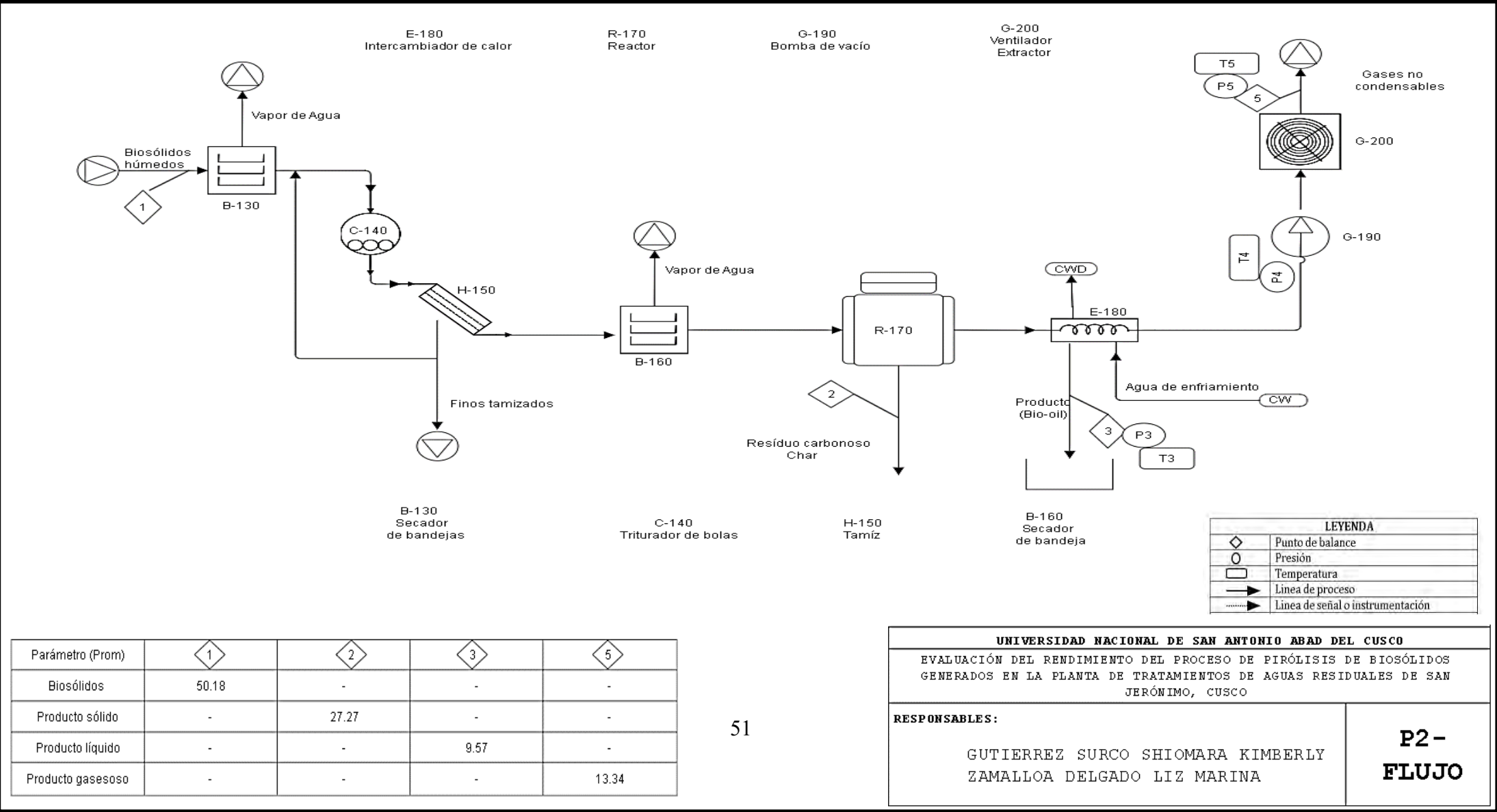
En el diagrama de bloques mostrado en la figura 5, se describen las etapas del proceso de pirólisis de biosólidos desarrollado a nivel de laboratorio. El proceso inicia con la recepción y almacenamiento de aproximadamente 70 kg de biosólidos húmedos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales. Posteriormente, el material pasa por una etapa de acondicionamiento que comprende el secado inicial para reducir la humedad, seguido de la trituración y tamizado con el fin de homogenizar el tamaño de partícula y eliminar impurezas. Luego, se realiza un secado complementario para disminuir aún más el contenido de agua antes del tratamiento térmico.

Una vez acondicionado el material, los biosólidos son introducidos en el reactor de pirólisis, donde se someten a calentamiento en ausencia de oxígeno. Durante esta etapa se generan vapores de pirólisis, residuos carbonosos (char) y gases no condensables. Los vapores producidos son conducidos hacia un sistema de condensación mediante agua de enfriamiento, permitiendo la obtención del producto líquido denominado bio-oil. Por otro lado, los gases no condensables son dirigidos hacia un sistema de extracción y evacuación.

Finalmente, el bio-oil recolectado es almacenado para su posterior caracterización físicoquímica, con el propósito de evaluar el rendimiento y la eficiencia del proceso de pirólisis aplicado a los biosólidos. En la figura 6 se representa el diagrama de flujo del proceso.

Figura 6

Diagrama de flujo de la pirólisis de biosólidos



3.6.2. Procedimiento experimental (Técnicas e instrumentos para la colecta de datos e instrumentos de medición)

A) Recolección de la muestra

La muestra de biosólidos fue recolectada en la planta de tratamiento de aguas residuales de San Jerónimo, Cusco. Se obtuvieron aproximadamente 70 kg de biosólidos, los cuales fueron transportados en un recipiente con aislamiento térmico para mantener la muestra a baja temperatura. Este procedimiento permitió evitar el sobrecalentamiento y reducir la liberación de gases potencialmente tóxicos durante el transporte (Figura 7).

Figura 7

Muestra de biosólidos húmedos recolectados de la PTAR



B) Preparación de la muestra

- Con la finalidad de reducir la humedad y eliminar los patógenos de la muestra de biosólidos se realizó un primer pretratamiento mediante el secado por calentamiento, obteniéndose una muestra semiseca de 25 kg, la cual fue triturada y tamizada para obtener biosólidos en forma de polvo y facilitar el proceso de pirolisis.
- Finalmente se llevó a cabo el segundo pretratamiento donde se colocó la muestra en una bandeja de metal en un horno de laboratorio a 200°C durante dos horas, obteniendo una muestra final de 5 kg libre de humedad y patógenos. El tamaño de la muestra estuvo constituido por una muestra no probabilística de 5 kg de bioasolidos secos.

C) Instrumentos y Equipos

Los instrumentos y equipos utilizados para el pretratamiento y caracterización de la muestra de biosólidos fueron:

- Estufa de secado, marca: SERIFAC, Rango de temperatura: + 5°C a + 300 °C
- Tamiz o malla para tamizar: Marca: Tecfresh, Modelo: TAM84002
- Calorímetro de bomba de oxígeno: Marca “Parr Instrument Company”
- Analizador termogravimétrico TGA-4000: Marca: Análisis térmico y elemental
- Balanza: Marca “Digital Precisión” (ES-500HA) que puede leer hasta 500 g con una precisión de 0.01g.
- Vaso de precipitado de 50 ml
- Probeta graduada de 100 ml
- Espátula o cuchara metálica
- Recipientes o bandejas de acero inoxidable

D) Caracterización de la muestra

- **Caracterización fisicoquímica de los biosólidos**
 - **Análisis termogravimétrico TGA y análisis próximo de la muestra de biosólidos**

Para realizar el análisis próximo y el análisis termogravimétrico, se envió al laboratorio 10.16 g de muestra de biosólido el cual fue introducido como carga en el analizador termogravimétrico TGA-4000 aplicando la norma ASTM D-7582. Este método permitió determinar los parámetros próximos: humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo.

1. Contenido de humedad

Para determinar el contenido de humedad se realizó mediante el análisis termogravimétrico TGA-4000 aplicando la ASTM D7582 donde se midió el contenido de agua presente en la muestra, desde la temperatura ambiente a los 120 °C en atmósfera de aire, equivale a la humedad adsorbida de la muestra.

2. Contenido de ceniza

El contenido de ceniza determina la cantidad de residuos inorgánicos que quedan después de la combustión a 700 °C y en atmósfera oxidante de aire, equivale a la masa de residuo inorgánico y no combustible que permanece tras la combustión. Se utilizó el análisis termogravimétrico TGA.

3. Contenido de materia volátil

También se determinó el contenido de sustancias orgánicas volátiles mediante análisis termogravimétrico (TGA-4000), aplicando la norma ASTM D7582. Para ello, la muestra se calentó desde 120 °C hasta 900 °C en una atmósfera inerte de nitrógeno, lo que permitió cuantificar la cantidad de sustancias orgánicas volátiles liberadas durante el calentamiento.

4. Contenido de carbón fijo

El contenido de carbón fijo se determinó por el contenido de carbón que queda como residuo sólido en el proceso de combustión después de eliminar la materia volátil. Se determinó mediante el análisis termogravimétrico TGA-4000 aplicando la ASTM D7582 mediante la diferencia entre el peso inicial y la suma de los pesos de humedad, materia volátil y cenizas.

➤ Análisis del poder calorífico (ASTM D-240)

Para determinar el poder calorífico de la muestra de biosólidos, se realizaron ensayos utilizando una bomba calorimétrica. En primer lugar, la muestra fue previamente pesada y colocada dentro del equipo, donde se sometió a combustión en presencia de oxígeno, bajo condiciones controladas. Durante el ensayo, se registraron las temperaturas inicial y final del sistema, necesarias para el cálculo del calor liberado. Asimismo, se midió la longitud inicial y final del alambre de nicrom, el cual actúa como elemento de ignición y también participa en la combustión. Este procedimiento experimental se presenta en la figura 8.

Figura 8

Determinación del poder calorífico



➤ **Análisis de la densidad aparente (ASTM E-873)**

En este caso, se determinó para una biomasa de naturaleza heterogénea. Para el ensayo, se utilizó un recipiente de volumen conocido (vaso de 50 ml). Este se llenó con la muestra de biomasa hasta la marca indicada, enrasando y nivelando su superficie para asegurar un volumen uniforme. Posteriormente, se procedió al pesaje en una balanza.

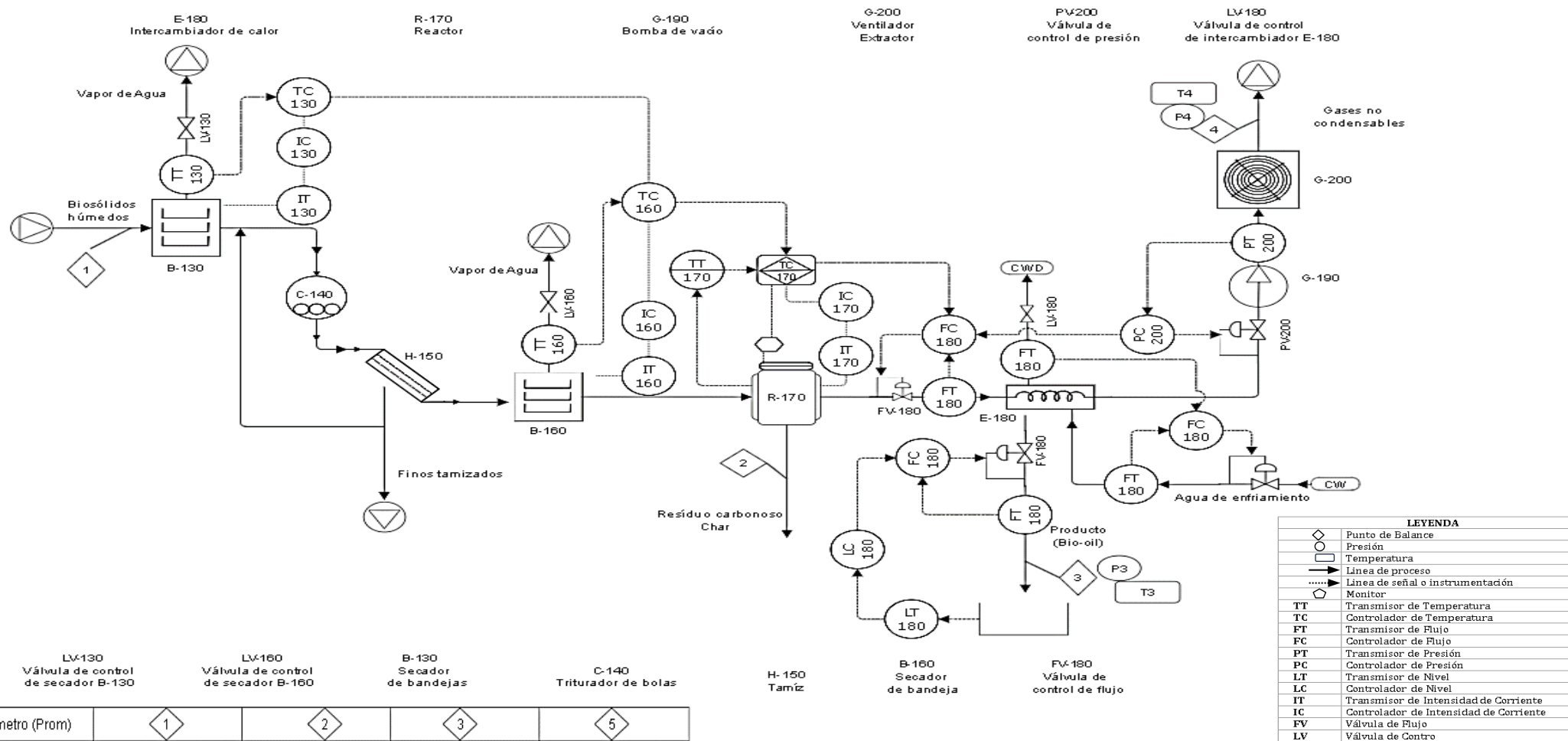
Luego, la muestra fue nuevamente nivelada dentro del recipiente con el fin de reducir los espacios vacíos y permitir la adición de mayor cantidad de material. Se realizó un nuevo pesaje bajo estas condiciones. Este procedimiento se repitió un total de cinco veces para obtener valores representativos y mejorar la precisión del cálculo de la densidad aparente.

- **Caracterización microbiológica de los biosólidos**

Para el análisis microbiológico de los lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas domésticas se evaluó y cuantifico la cantidad de microorganismos presentes en la muestra de biosólidos, con la finalidad de determinar la presencia, cantidad y tipo de microorganismos, como bacterias, hongos, levaduras y virus, en la muestra. Esto es fundamental para asegurar la calidad, seguridad y eficiencia de los procesos químicos y productos (Skodras et al., 2006).

Figura 9

Diagrama P&ID del proceso de pirólisis



Parámetro (Prom)	1	2	3	5
Biosólidos	50.18	-	-	-
Producto sólido	-	27.27	-	-
Producto líquido	-	-	9.57	-
Producto gaseoso	-	-	-	13.34

La nomenclatura y codificación de los equipos e instrumentos empleados durante el proceso experimental se muestran en la Figura 9 (Diagrama P&ID del sistema de pirólisis).

E) Puesta en Marcha del Sistema

- ✓ Antes del inicio de cada corrida experimental, se verificó la hermeticidad y el correcto acoplamiento de todos los componentes del sistema de pirólisis, incluyendo reactor semibatch R-170, conexiones, intercambiador de calor E-180 y sistema de vacío (bomba de vacío G-190). Posteriormente, se pesaron el reactor y cada uno de sus componentes utilizando una balanza digital calibrada, con el fin de realizar el balance de materia correspondiente.
- ✓ La muestra de biosólidos previamente tratada fue introducida en el reactor de pirólisis, el cual fue sellado herméticamente y colocado en el interior del horno eléctrico. Seguidamente, se conectó el sistema de condensación E-180 mediante circulación continua de agua para favorecer la recuperación de los vapores condensables.
- ✓ A continuación, se activó el sistema de adquisición de datos conformado por la termocupla tipo K y los instrumentos de temperatura TT-170, permitiendo el monitoreo continuo de la temperatura del reactor mediante el software Logger Pro. Finalmente, se puso en funcionamiento la bomba de vacío G-190 y el sistema de extracción G-200, con el propósito de facilitar el desplazamiento de los vapores generados hacia el condensador E-180 y evitar el ingreso de oxígeno al sistema.

F) Proceso de pirólisis a diferentes temperaturas

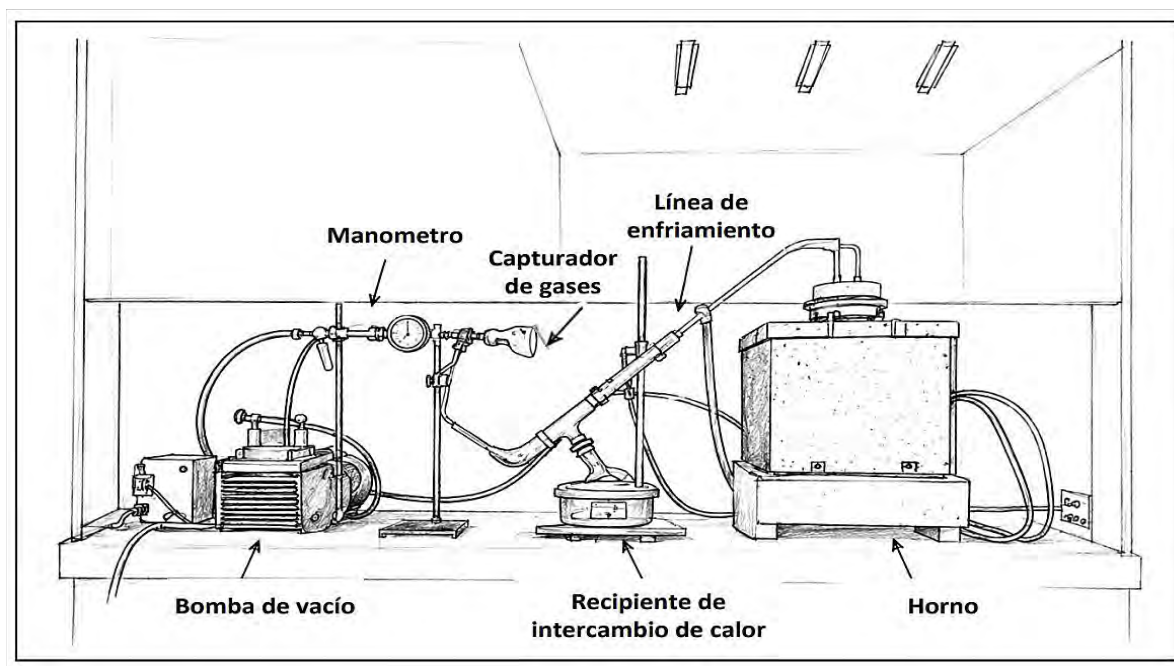
- ✓ Para cada corrida experimental se utilizaron 50 g de muestra.
- ✓ El calentamiento del reactor se efectuó mediante un horno eléctrico, registrándose continuamente la temperatura interna mediante una termocupla tipo K conectada al sistema de adquisición de datos.
- ✓ Durante el proceso, la descomposición térmica de los biosólidos generó productos sólidos, líquidos y gaseosos. Los vapores condensables producidos fueron conducidos hacia el sistema de enfriamiento para la obtención del producto líquido, mientras que los gases no condensables fueron evacuados a través del sistema de venteo.

- ✓ Finalizada cada corrida experimental, el reactor se dejó enfriar a temperatura ambiente antes de proceder a la recolección y pesaje de los productos obtenidos. Posteriormente, se determinó el rendimiento de las fracciones líquida, sólida y gaseosa mediante balance de materia expresado en porcentaje masa/masa (% m/m).

En la Figura 10, se observa los equipos del proceso de pirólisis compuesto por 1 reactor, 1 condensador, 1 horno eléctrico y una bomba al vacío para reducir la presión, esquema elaborado por los investigadores del presente trabajo.

Figura 10

Esquema del sistema experimental para la pirólisis de biosólidos



G) Tratamiento de productos

- El producto líquido se pesó y almacenó en botellas ámbar como se muestra en la figura 11, para su posterior análisis.

Figura 11

Almacenamiento de productos líquidos



H) Caracterización fisicoquímica del líquido obtenido

Utilizando las condiciones operativas que lograron el mayor rendimiento de productos líquidos, se llevaron a cabo pruebas experimentales de pirólisis de biosólidos para la obtención de productos líquidos.

❖ Viscosidad “ASTM D445”

Se determinó el tiempo que tarda la muestra en desplazarse por acción de la gravedad a través del capilar del viscosímetro, manteniendo una temperatura constante y controlada de 40 °C (figura 12). Posteriormente, la viscosidad se obtiene al multiplicar el tiempo medido por la constante de calibración propia del viscosímetro.

Figura 12

Baño isotérmico acoplado a un viscosímetro capilar



❖ Cantidad de agua por Destilación “ASTM D95 ADAPTADO”

La prueba requirió una manta calefactora modelo HEAM-051-001 de la marca “lhx”, un equipo de destilación (balón, trampa de 10 ml y refrigerante) y tolueno como solvente (figura 13). Se mezclan 2 ml de muestra con 68 ml de tolueno en el balón, se ensambla el sistema y se calienta controlando la ebullición, mientras circula agua por el refrigerante. Tras la destilación, la mezcla condensada se acumula en la trampa, donde se separan las fases; el volumen de agua recolectado en la parte inferior se mide y se expresa como porcentaje respecto al total.

Figura 13

Manta calefactora y equipo de destilación



❖ Destilación “ASTM D86”

Se utilizó 100 ml del producto obtenido y un equipo de destilación semiautomático. Durante este proceso se señala la temperatura del punto final y las temperaturas para el 5%, 10%, 50% y 90% de destilado. Este análisis permite determinar los cortes característicos del producto obtenido y estos introducirlos al software DWSIM para comprobar sus propiedades en calidad.

❖ Poder calorífico “ASTM D240” (líquido)

Se peso una muestra de aproximadamente 1g y luego se introdujo en un calorímetro de bomba de oxígeno de marca “Parr Instrument Company” (figura 14), donde fue

sometida a combustión en una atmósfera de oxígeno a presión y bajo condiciones controladas. Esta propiedad fisicoquímica se determinó mediante el registro de la variación de temperatura antes, durante y después del proceso de combustión.

Figura 14

Análisis de poder calorífico “ASTM D240”



❖ Densidad

Para hallar la densidad se vertió todo el producto líquido en una pera de decantación para la separación de las fases (figura 15). Luego de un tiempo de reposo se formaron dos fases y posteriormente se separó la fase inferior (fase acuosa) quedando en la pera la fase orgánica. Se colocó la fase orgánica en un picnómetro de 25 ml a temperatura ambiente y así se pudo calcular la densidad, dividiendo la masa del producto líquido entre su volumen.

Figura 15

Pera de decantación

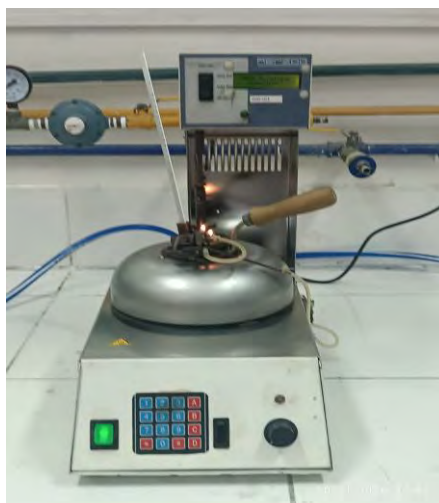


❖ **Punto de Inflamación Pensky-Martens “ASTM D93”**

Mediante el equipo de copa cerrada de Pensky-Martens Herzog HFP 380, se colocó la muestra en una copa de latón que se sella con una tapa, la cual permite introducir periódicamente una fuente de ignición (figura 16). El líquido se calienta y agita a una velocidad determinada según el tipo de material, favoreciendo el equilibrio entre la fase líquida y los vapores. A intervalos regulares se aplica la llama de prueba, deteniendo momentáneamente la agitación. El ensayo finaliza cuando se observa una llamarada dentro de la copa; la temperatura registrada en ese instante corresponde al punto de inflamación del líquido.

Figura 16

Equipo de medición del punto de inflamación Pensky-Martens



❖ **Punto de Fluidez “ASTM D97”**

Mediante el equipo “HK-3535 Liaoning Huake Petroleum Apparatus Science & Technology”, se determinó calentando una muestra del líquido obtenido contenido en un recipiente cilíndrico de vidrio y luego enfriándolo a velocidad constante (figura 17), examinando la temperatura cada 3°C hasta que se deje de ver el movimiento del líquido. La menor temperatura registrada será el punto de fluidez.

Figura 17

Equipo de medición de punto de fluidez



❖ **Análisis FTIR**

La identificación de los grupos funcionales presentes en el producto líquido se realizó mediante espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), empleando un espectrómetro IRAffinity-1 de Shimadzu Corp. y el software IRsolution versión 1.5. Para el análisis, se diluyó una muestra del producto en 20 mL de n-pentano y se tomó una alícuota, la cual se colocó en una celda de cuarzo previamente escaneada. El espectro FTIR se registró en un intervalo de 400 a 4600 cm^{-1} , con una resolución de 4 cm^{-1} .

3.6.3. Métodos de análisis de datos

o Análisis cuantitativo

Se empleó el cálculo de rendimientos de los productos obtenidos mediante la ecuación 2 del Rendimiento de productos líquidos.

o Análisis estadístico

Se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) de un factor para evaluar la influencia de la temperatura sobre el rendimiento del producto líquido. El Software utilizado fue Minitab con un nivel de significancia 0.05. Este análisis permitió determinar si existían diferencias significativas entre los tratamientos (700, 750, 800 y 850 $^{\circ}\text{C}$).

o Prueba de comparación de medias (Tukey)

Una vez identificado que existen diferencias significativas mediante el ANOVA, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey (HSD) con el fin de determinar específicamente qué temperaturas presentan diferencias significativas entre sí.

Esta prueba permite agrupar los tratamientos en función de sus medias, identificando aquellos que son estadísticamente iguales o diferentes, lo cual facilita la selección de la temperatura adecuada del proceso.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.7. Resultados

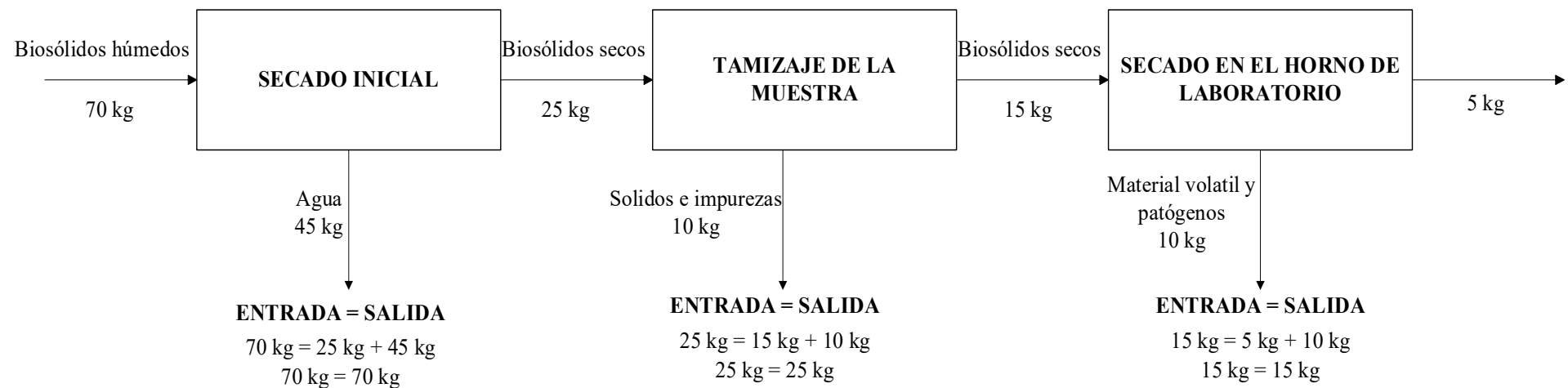
3.7.1. Caracterización de la materia prima (Biosólidos)

- **Análisis del balance de materia**

En la siguiente figura 18 se muestra el balance de materia de los biosólidos después de los pretratamientos (secado inicial, tamizaje de la muestra y secado en el horno de laboratorio).

Figura 18

Balance de Materia del Proceso de Pretratamiento de Biosólidos



En la tabla 11 se muestra el balance de materia del pretratamiento de Biosólidos.

Tabla 11

Balance de entrada y salida en el Pretratamiento de Biosólidos

Etapas del proceso	Masa inicial (Kg)	Masa final (Kg)	Pérdida de masa (Kg)	Descripción del proceso
Secado inicial de los biosólidos húmedos	70	25	45	Se logró la eliminación de la humedad mediante el secado inicial de la muestra de biosólidos.
Tamizaje de la muestra seca	25	15	10	Se realizó la separación de partículas gruesas y materiales no deseados.
Secado final en el horno de laboratorio	15	5	10	Se logró la eliminación de materia orgánica volátil, patógenos y la estabilización del sólido.

El balance de materia presentado evidencia una reducción progresiva de la masa de biosólidos desde 70 kg (estado húmedo) hasta 5 kg después del secado final, lo cual responde principalmente a la eliminación de agua, compuestos volátiles e impurezas. Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura para biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales.

En la etapa de secado inicial, la reducción de 70 kg a 25 kg implica la eliminación de aproximadamente 64.3% de agua. Este resultado es coherente con lo señalado por Fytili & Zabaniotou (2008), quienes indican que los biosólidos pueden contener entre 70% y 80% de humedad en condiciones iniciales. De manera similar, Hu & Chen (2025) destacan que los lodos residuales requieren procesos de deshidratación para mejorar su manejo y posterior valorización.

Durante el tamizaje, la reducción de 25 kg a 15 kg (40%) sugiere una cantidad considerable de impurezas o materiales no deseados. Según Inguanzo et al. (2002), la presencia de materiales inertes en biosólidos puede afectar negativamente los procesos termoquímicos, disminuyendo la eficiencia y calidad de los productos obtenidos. En este

sentido, aunque el tamizaje mejora la homogeneidad del material, la elevada pérdida podría indicar la necesidad de optimizar esta etapa.

En la fase de secado en horno, la disminución de 15 kg a 5 kg (66.7%) corresponde a la eliminación de humedad residual y compuestos volátiles. Este resultado es consistente con lo reportado por Ábrego et al. (2008), quienes señalan que el secado térmico permite reducir el contenido de humedad a niveles inferiores al 10%, condición ideal para procesos como la pirólisis, ya que mejora la eficiencia energética y el rendimiento de productos.

A partir de estos resultados se puede concluir que la cantidad de materia utilizada (biosólidos secos) es de 5 kg los cuales fueron utilizados en el proceso de pirolisis de los biosólidos.

El rendimiento de la materia de los biosólidos se calculó en función del peso inicial de biosólidos húmedos y el peso final de los biosólidos secos después del pretratamiento. Según Inguanzo et al. (2002), para determinar el rendimiento de la muestra de biosólidos se utilizó la ecuación 1 básica:

$$\text{Rendimiento (\%)} = \left(\frac{\text{Peso Seco (Kg)}}{\text{Peso Húmedo (Kg)}} \right) \times 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \left(\frac{5 \text{ (Kg)}}{70 \text{ (Kg)}} \right) \times 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = 7.14\%$$

Este resultado significa que, de toda la masa inicial de los biosólidos, el 7.14% correspondía al material sólido libre de humedad, agentes volátiles y patógenos. Este rendimiento resulta relativamente bajo en comparación con otros estudios. Por ejemplo, Inguanzo et al. (2002), reportan que los rendimientos de materia seca utilizable en biosólidos pueden variar entre 10% y 30% del peso húmedo inicial, dependiendo del grado de pretratamiento. Asimismo, Messaoudi et al. (2024), destacan que un adecuado acondicionamiento previo puede incrementar significativamente la eficiencia del proceso de pirólisis.

- **Análisis Próximo y termogravimétrico de la materia prima**

Los resultados de la caracterización se muestran en la siguiente tabla 12

Tabla 12

Resultados de la Caracterización Fisicoquímica de los Biosólidos

ENSAYO	MÉTODO	RESULTADO
Contenido de humedad (%)	ASTM D-7582	2.024
Contenido de ceniza (%)	ASTM D-7582	49.696
Contenido de materia volátil (%)	ASTM D-7582	44.989
Contenido de carbón fijo (%)	ASTM D-7582	2.793
Poder calorífico (MJ/kg)	ASTM D-240	10.637
Densidad aparente (g/cm³)	ASTM E-873	0.714

Nota: La suma de los porcentajes puede diferir ligeramente de 100 % debido al redondeo decimal y a variaciones inherentes al método experimental ASTM D-7582.

El análisis próximo es un método estandarizado que determina la composición elemental básica de un material sólido en términos de sus cuatro fracciones principales: humedad, materia volátil, carbono fijo, cenizas. Estos valores se expresan en porcentaje en masa (%) y suman aproximadamente el 100 % del material analizado como se muestra en la tabla 12. Con estos parámetros se determina la calidad energética, el comportamiento térmico y la composición básica de los biosólidos.

La baja humedad evidencia que el pretratamiento térmico fue eficiente, reduciendo el consumo energético durante la pirólisis, permitiendo que una mayor fracción energética se destine a las reacciones de descomposición térmica. El alto contenido de materia volátil representa los compuestos susceptibles de transformarse en vapores condensables y gases. Por ello, este parámetro es un indicador directo del potencial de producción de bioaceite. El alto contenido de cenizas es característico de biosólidos de PTAR, las cenizas provienen principalmente de sílice, fosfatos, carbonatos, óxidos metálicos y metales pesados retenidos durante el tratamiento de aguas. Este elevado contenido mineral limita el rendimiento de bioaceite porque una gran parte de la masa inicial no es convertible en compuestos orgánicos y el bajo carbón fijo indica que

la mayor parte del material orgánico estaba disponible para volatilizarse durante la pirólisis. Por tanto, el sistema favoreció la formación de líquidos y gases antes que la producción de char.

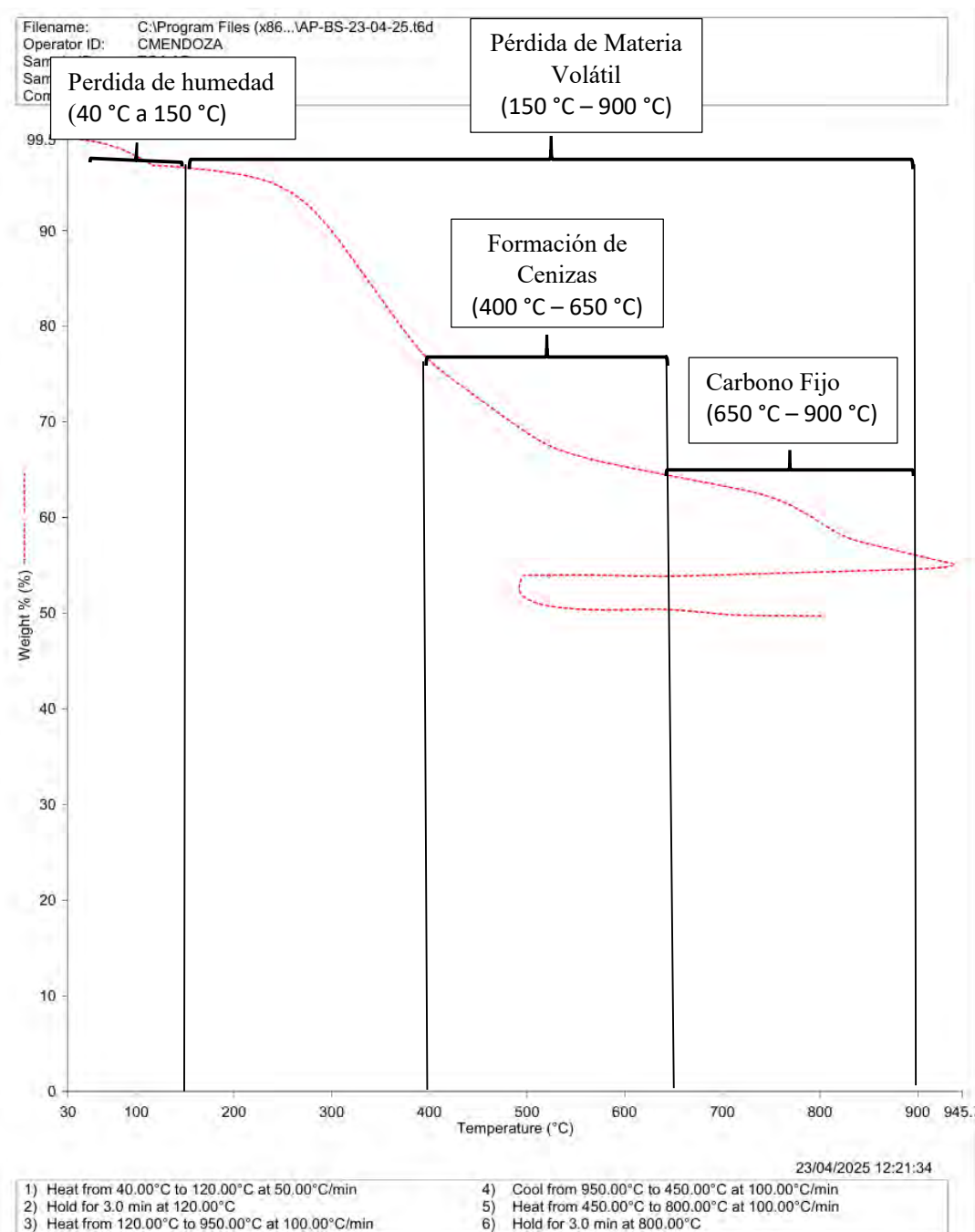
➤ **Parámetros Proximales Evaluados**

Se muestran gráficamente en la figura 19 y presentan las siguientes etapas:

- ✓ **Primera etapa:** Pérdida de humedad (40 °C a 150 °C):
 - Pequeña pérdida de masa (~2–5%).
 - Corresponde a la evaporación de agua libre y absorbida. Esto confirma la eficiencia del acondicionamiento de la muestra.
- ✓ **Segunda etapa:** Pérdida de Materia Volátil (150 °C – 900 °C):
 - Disminución significativa de peso (pérdida orgánica inicial).
 - Se produce la descomposición de materia orgánica volátil, como proteínas, lípidos y carbohidratos.
 - Se liberan gases ligeros (H_2O , CO_2 , CO , CH_4 , NH_3 , etc.).
- ✓ **Tercera etapa:** Formación de Cenizas (400 °C – 650 °C):
 - Segunda caída marcada del peso.
 - Asociada a la pirólisis secundaria y carbonización de residuos orgánicos más complejos (celulosa, lignina, compuestos nitrogenados y azufrados).
 - Ocurre el craqueo térmico de moléculas pesadas.
- ✓ **Cuarta etapa:** Carbón Fijo (650 °C – 900 °C):
 - La curva se estabiliza con una masa remanente cercana al 45–50%.
 - Indica el contenido de cenizas y compuestos minerales no combustibles (óxidos metálicos, silicatos, fosfatos, etc.).
 - En procesos petroquímicos, este residuo es equivalente a la fracción inerte del “char”.

Figura 19

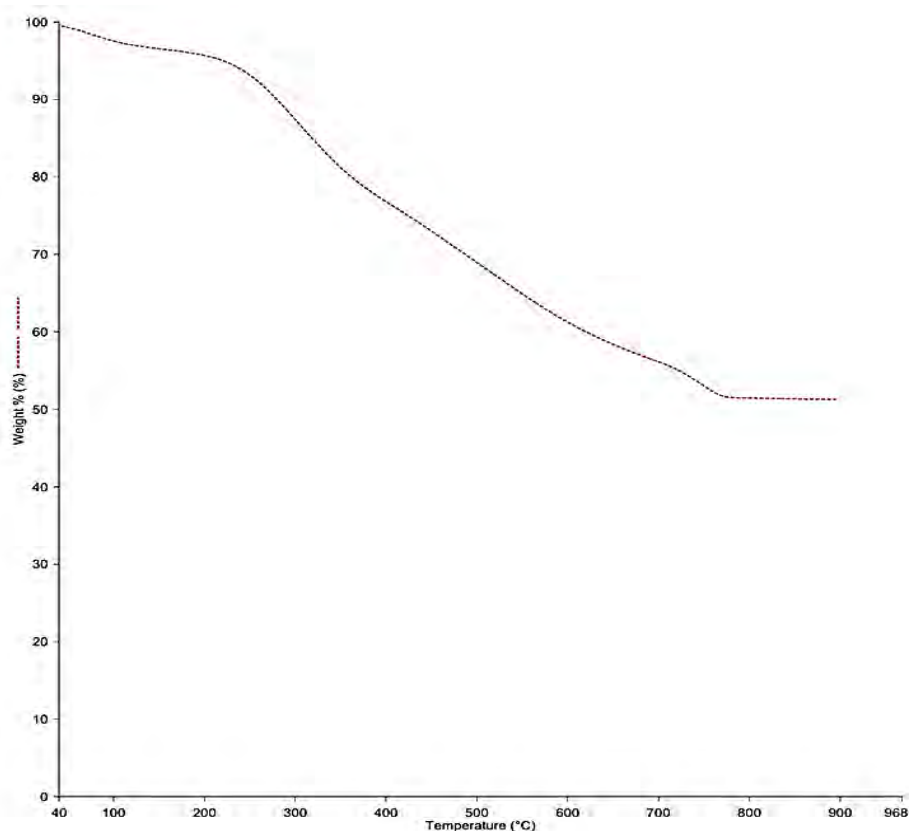
Curva del Análisis próximo TGA para determinación de cenizas y carbón



Asimismo, el recalentamiento observado en la etapa final de la curva corresponde al procedimiento del método ASTM D-7582 para la oxidación del carbón residual y determinación del contenido de cenizas. Las pequeñas fluctuaciones observadas durante el cambio de rampa térmica se atribuyen a ajustes instrumentales del equipo TGA y no a incrementos reales de masa de la muestra.

Figura 20

Comportamiento de degradación térmica de los biosólidos mediante análisis termogravimétrico (TGA)



La curva de análisis termogravimétrico (TGA) obtenida para los biosólidos en la figura 20 evidencia un comportamiento típico de materiales orgánico-minerales sometidos a calentamiento controlado. En el rango inicial (40–150 °C) se observa una pérdida de masa moderada asociada principalmente a la eliminación de humedad libre y agua físicamente absorbida. Posteriormente, entre aproximadamente 200 y 600 °C, ocurre el tramo de mayor decrecimiento en el peso, atribuible a la descomposición térmica de los compuestos orgánicos volátiles y materiales fácilmente degradables. A partir de 600 °C, la pendiente disminuye y la pérdida de masa se vincula a la degradación de fracciones más estables como lignina, proteínas y compuestos carbonosos residuales. Finalmente, por encima de 700 °C la curva se estabiliza, la cual permanece prácticamente constante hasta 900 °C, este resultado es similar a los expuestos por Messaoudi et al. (2024), donde obtienen la mayor pérdida de masa entre los 150–560 °C.

- **Análisis microbiológico**

En las siguientes tablas 13 y 14 se muestra el informe del ensayo microbiológico antes del pretratamiento de los biosólidos, realizado en el laboratorio de Hidrobiología / Metales / Agrícola / Ambiental / Laboratorio Subcontratado por EPS. SEDACUSCO S.A.

Tabla 13

Resultados del Análisis Microbiológico antes del Pretratamiento de Biosólidos

GRUPO	CLASE	RESULTADOS (HUEVOS/L)
HELMINTOS	Trematoda	< 1
	Cestoda	< 1
	Nematoda	< 1
	Acanthocephala	< 1

Nota. Datos de Laboratorio de Hidrobiología (2025)

Tabla 14

Análisis Bacteriano de los Biosólidos

ENSAYO	LDM	UNIDAD	RESULTADO
Salmonella sp	1.8	NMP/10g ST	< 1.8

Nota. Datos de Laboratorio de Hidrobiología (2025)

En la tabla 15 se observa los resultados del análisis microbiológico después del pretratamiento de la muestra de biosólidos, este ensayo se realizó en el laboratorio LAASA LAB.

Tabla 15*Resultados del Análisis Microbiológico después del Pretratamiento de Biosólidos*

DETERMINACIONES	UNIDAD	RESULTADOS
Recuento Total Microorganismos Aerobios viables	UFC/g	145
Coliformes Totales	NMP/g	43
Coliformes Termotolerantes	NMP/g	0
E. coli	NMP/g	0
Salmonella sp	UFC/25g	0
Hongos	UFC/g	58
Huevos de Helminthos	Nº Huevos x 40g	0

Nota. Datos del laboratorio LAASA LAB EIRL., (2025)

Haciendo una comparación entre ambos ensayos del análisis microbiológico de los biosólidos antes y después del pretratamiento, se puede afirmar que los biosólidos después del pretratamiento que se realizó en un horno de laboratorio a 200 °C, está libre de los principales contaminantes y patógenos como son los huevos de Helminthos y Salmonella sp.

3.7.2. Discusión acerca de la caracterización de la materia prima

A la materia prima utilizada que en este caso son los biosólidos, se les realizó los ensayos de contenido de humedad, contenido de ceniza, materia volátil, carbono fijo, poder calorífico y densidad aparente. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 16, donde se comparan los resultados con otros autores.

Tabla 16

Comparación de las Características Fisicoquímicas de la Materia Prima

Autores	Investigación	(Messaoui et al., 2024)	(Inganzo, et al., 2002)	(Saccani et al., 2014)	(Fytili & Zabaniotou, 2008)	(Ábrego et al., 2008)	(Ordóñez, 2019)	(Hu & Chen, 2025)
Material volátil	44.989	48	60.7	56.63	59	42.12	40	48.34
Carbón fijo	2.793	Nd	Nd	7.47	9	6.66	Nd	10.25
Ceniza	49.696	37	29.5	36	Nd	42.30	Nd	40.41
Humedad	2.024	Nd	5.2	Nd	5	6	1.84	1.05
Poder calorífico superior (MJ/kg)	10.637	15	16.558	16	11	Nd	Nd	19
Densidad aparente (g/cm3)	0.714	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd

En muchos estudios de biosólidos crudos, el contenido de humedad suele ser muy alto, típicamente entre 71–89% antes de secado por el alto contenido de agua inherente a los lodos de las depuradoras (Saccani et al., 2014).

En la investigación realizada por Hu & Chen (2025), reportan que el contenido de humedad de un lodo puede variar entre 1.05-10 % de humedad. Esto hace necesario un secado previo si se pretende aplicar procesos termoquímicos como pirólisis o combustión. Podemos afirmar que el contenido de humedad de la muestra obtenida de 2.024 %, indica un nivel de deshidratación y secado muy eficiente, que además este resultado concuerda con la investigación de Ordóñez, (2019) donde reporta un factor de corrección de humedad de 1.84 %. Esto puede favorecer una mejor eficiencia en la producción de biocombustibles, ya que menos energía se pierde al evaporar agua durante la conversión térmica.

En los antecedentes estudiados, el contenido de ceniza de biosólidos puede variar ampliamente, desde 16% hasta 64.82% en base seca, dependiendo del origen y tratamiento del lodo (Hu & Chen, 2025). El contenido de ceniza obtenido de 49.69% coincide con muchos biosólidos con alto residuo inorgánico, como es el caso de la investigación de Ábrego et al. (2008), cuyo contenido de cenizas es de 42.30 %. Esto indica que nuestros biosólidos tienen un perfil típico de residuo con alta carga mineral, lo que explica simultáneamente una menor energía utilizable en comparación con biomásas con menor ceniza.

Los contenidos de materia volátil también suelen ser altos, dado que el material orgánico es su principal fracción combustible; los rangos reportados son de 29.88-66.8% (Hu & Chen, 2025).

El contenido de materia volátil obtenido cercano al 45% puede considerarse moderado y sugiere que una fracción significativa del material orgánico presente en los biosólidos es susceptible de descomposición térmica. Esto quiere decir que los biosólidos tienen potencial energético y pueden transformarse químicamente en un combustible cuando se someten a altas temperaturas (Messaoudi et al., 2024).

En la investigación de Ábrego et al. (2008), se obtuvo un valor similar de 42.12% de material volátil similar a lo obtenido en la investigación de Ordóñez (2019), en su trabajo reporta 40% de materia volátil.

En algunos estudios de lodos de plantas de tratamiento, se han reportado poder calorífico menores a alrededor de ~ 2.1 MJ/kg en biosólidos húmedos sin secar. En estudios en seco, se han observado valores típicos en rangos de ~ 9 – 29 MJ/kg en diferentes tipos de lodos y tratamientos (Hu & Chen, 2025).

El valor obtenido de 10.6 MJ/kg es similar al valor obtenido en la investigación de Fytili & Zabaniotou (2008), cuyo valor de poder calorífico fue de 11 MJ/kg, se considera relativamente aceptable para lodos tratados, aunque tiende a ser inferior al de biocombustibles sólidos tradicionales (por ejemplo, madera o residuos agrícolas con valores entre 15 – 20 MJ/kg). Esta menor energía se explica por el mayor contenido de ceniza y menor contenido de carbono fijo, que reduce la fracción disponible para combustión energética. Esto significa que los biosólidos tienen potencial para producir combustible líquido o biocombustible, pero requiere procesos eficientes de conversión energética como es el proceso de pirólisis térmica.

En estudios similares de biosólidos, la fracción de carbono fijo en base seca suele ser baja ($<10\%$), ya que gran parte del material orgánico es volátil o cenizas (Saccani et al., 2014).

Un porcentaje de carbono fijo menor al 5% indica que, durante los procesos de conversión térmica, se generará una cantidad reducida de residuo sólido tipo char. Este comportamiento concuerda con lo reportado en la literatura para biosólidos, donde la mayor parte del carbono se libera en forma de compuestos volátiles durante la pirólisis, favoreciendo la producción de bio-oil y gases combustibles frente a la formación de carbón sólido (Ghodke et al., 2021).

Los dos parámetros más importantes para decidir si un biosólido es apto para la producción de bioaceite mediante la pirólisis son el contenido de materia volátil y el poder calorífico superior, ya que ambos controlan el rendimiento y la calidad de los productos obtenidos (bioaceite, biogás y biocarbón) (Alvarez et al., 2016).

Según Ghodke et al. (2021b), se consideran generalmente adecuados para la conversión termoquímica orientada a la obtención de bioaceite los siguientes intervalos:

- Materia volátil: óptimo entre 50 y 60% para maximizar la producción de bioaceite.

- Poder calorífico superior: Preferiblemente 15–20 MJ/kg para mejorar el balance energético del proceso.

En consecuencia, la muestra (44.99 % de materia volátil y 10.64 MJ/kg de poder calorífico) cumple con los criterios mínimos de aptitud para procesos de pirólisis, aunque el elevado contenido de cenizas probablemente limitará el rendimiento de bioaceite y favorecerá una mayor producción de biocarbón y gases, comportamiento característico de los biosólidos provenientes de aguas residuales.

3.7.3. Determinación del rendimiento de los productos líquidos

En la tabla 17 se presenta el rendimiento de productos líquidos, sólidos y gaseosos obtenidos mediante la realización de ensayos experimentales a las diferentes temperaturas propuestas. Se ejecutaron tres repeticiones por ensayo, en total 12 ensayos.

Los rendimientos de los productos obtenidos se calcularon en función de la masa inicial de biosólidos alimentada al reactor, empleando la ecuación 2 del Rendimiento de Productos Líquidos.

El rendimiento del gas se determinó por diferencia como se muestra a continuación:

$$\%R_{gas} = 100 - (\%R_{líquido} + \%R_{sólido}) \quad (4)$$

Tabla 17*Rendimiento de los Productos de Pirolisis (%m/m)*

Nº	Temperatura °C	% Líquido	% Sólido	% Gas
1	700	20.2	56.44	23.37
2	700	20.1	57.97	21.91
3	700	19.4	58.80	21.80
4	750	20.8	56.60	22.60
5	750	22.0	56.09	21.96
6	750	20.6	52.69	26.75
7	800	20.3	54.64	25.05
8	800	15.6	44.91	39.52
9	800	21.4	52.60	26.00
10	850	15.6	54.40	30.00
11	850	17.5	55.56	26.98
12	850	16.6	57.49	25.95

En la tabla 18, los resultados se expresan como media $\pm$ desviación estándar de tres repeticiones experimentales de los productos líquidos, sólido y gas obtenidos y expresados en porcentaje.

Tabla 18

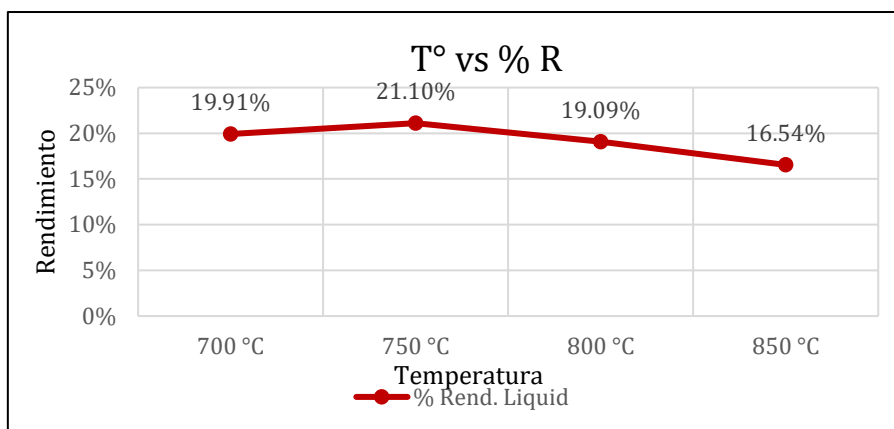
Rendimiento promedio de los productos obtenidos mediante pirólisis de biosólidos (%m/m)

Temperatura (°C)	Líquido (%m/m)	Sólido (%m/m)	Gas (%m/m)
700	19.90 $\pm$ 0.44	57.74 $\pm$ 1.20	22.36 $\pm$ 0.88
750	21.13 $\pm$ 0.76	55.13 $\pm$ 2.13	23.77 $\pm$ 2.60
800	19.10 $\pm$ 3.08	50.72 $\pm$ 5.13	30.19 $\pm$ 8.09
850	16.57 $\pm$ 0.95	55.82 $\pm$ 1.56	27.64 $\pm$ 2.10

En la figura 21 se muestra el rendimiento promedio de productos líquidos en función de la temperatura de pirólisis, en el cual se evidencia que el mayor rendimiento fue a 750 °C.

Figura 21

Gráfica del Rendimiento promedio de productos líquidos obtenidos mediante pirólisis térmica



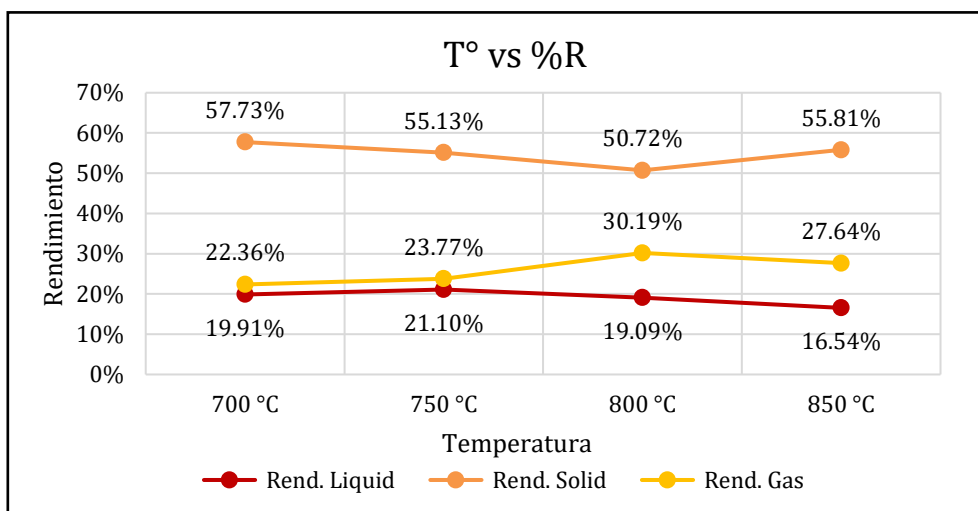
3.7.4. Discusión acerca del rendimiento de los productos obtenidos mediante pirólisis

- **Pirólisis térmica**

En la figura 22 se muestran los resultados del rendimiento promedio de los productos de pirólisis a diferentes temperaturas en un reactor semicontinuo, observando que a la temperatura de 750 °C se obtiene el mayor rendimiento de productos líquidos (21.1%), una disminución en el rendimiento de productos sólidos (55.1 %) y el incremento de productos gaseosos (23.8 %).

Figura 22

Rendimiento promedio de los productos obtenidos mediante pirólisis térmica



Los resultados experimentales evidencian que la temperatura de pirólisis influye de manera significativa en la distribución de los productos obtenidos (líquido, sólido y gaseoso) a partir de los biosólidos generados en la PTAR de San Jerónimo, Cusco. En el rango de temperaturas evaluado (700–850 °C), se observó que el mayor rendimiento de producto líquido se alcanzó a 750 °C, con valores cercanos al 22 %, mientras que a temperaturas superiores el rendimiento disminuyó progresivamente. Se eligió el reactor semicontinuo porque es el diseño estándar para estudios exploratorios de pirólisis a escala de laboratorio dado que permite cargar la materia prima en lote, extraer continuamente los vapores hacia el sistema de condensación para recuperar el producto líquido, y separar físicamente las tres fracciones de producto con alta reproducibilidad. Su simplicidad operativa es una fortaleza para un primer estudio con esta materia prima específica, aunque se reconoce que su tiempo de residencia de vapores mayor al de un lecho fluidizado limita el rendimiento líquido máximo alcanzable.

En el estudio de Ghodke et al. (2021), la temperatura es un parámetro determinante en la distribución de los productos generados durante la pirólisis de biosólidos puesto que han demostrado que el incremento de la temperatura favorece inicialmente la formación de bioaceite, alcanzando un rendimiento máximo en torno a los 500 °C. La temperatura difiere con la del presente estudio dado que la humedad de materia prima fue mayor a 10 % la cual afecta directamente a la eficiencia de líquido obtenido, así como el tipo de reactor que fue cilíndrico de vidrio de lecho fijo a velocidades de 10

°C/min, por lo tanto, se infiere que a mayores temperaturas de calentamiento el reactor podría quebrarse. Sin embargo, a temperaturas superiores no se evidencian aumentos significativos en la fracción líquida, observándose en cambio un incremento progresivo en la producción de gases de pirólisis, acompañado de una disminución del rendimiento del biocarbón. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Fytili & Zabaniotou (2008), quienes señalan que en la pirólisis de biosólidos existe una temperatura intermedia en la cual se existe una mayor formación de compuestos líquidos condensables. A temperaturas moderadas, la degradación térmica de proteínas, lípidos y carbohidratos favorece la formación de vapores orgánicos pesados que, al condensarse, incrementan el rendimiento de bioaceite.

Añadido a esto, los resultados obtenidos en el presente estudio indican que el mejor rendimiento de producto líquido se alcanzó a una temperatura superior a la reportada por Alvarez et al. (2016), quienes identificaron un máximo rendimiento de 48.5 % alrededor de 500 °C, puesto que en este trabajo se empleó un reactor de lecho cónico en surtidor bajo condiciones de pirólisis rápida. Esta diferencia de temperatura puede atribuirse principalmente al tipo de reactor y al régimen de calentamiento, ya que en sistemas de pirólisis rápida los vapores generados son evacuados casi instantáneamente, minimizando reacciones secundarias, mientras que en reactores discontinuos o de calentamiento más lento, como el utilizado en este estudio, se requiere una mayor temperatura para promover una desvolatilización más completa de la materia orgánica. Asimismo, las características fisicoquímicas de los biosólidos de la PTAR de San Jerónimo, en particular su contenido de cenizas y compuestos inorgánicos, pueden favorecer reacciones catalíticas que intensifican el craqueo secundario a temperaturas moderadas, desplazando el punto mayor de producción de líquidos hacia temperaturas más elevadas. En este contexto, el incremento del rendimiento gaseoso observado a temperaturas superiores a 750 °C concuerda con lo reportado por Alvarez et al. (2016), quienes atribuyen este comportamiento a la descomposición secundaria de los vapores de pirólisis y del carbón, confirmando que la temperatura ideal para mejorar el bioaceite también depende fuertemente del diseño del reactor y de la naturaleza del biosólido tratado. El mayor tiempo de residencia de vapores en el reactor semicontinuo del presente estudio favorece el craqueo secundario, lo que limita el rendimiento líquido máximo alcanzable; sin embargo, esta limitación es inherente al diseño seleccionado y coherente con los resultados obtenidos.

En el trabajo realizado por Ábrego et al. (2008), el cual utilizó un reactor de lecho fijo a velocidades ~ 200 °C/min, se observó que el tipo de biosólido tiene un efecto determinante en la producción de líquidos. El lodo no digerido (biosólido crudo), caracterizado por un mayor contenido de materia volátil y menor proporción de cenizas, presentó rendimientos líquidos superiores de 15–30 % que el lodo digerido anaeróbicamente (biosólido de clase B). Este comportamiento se atribuye a que los compuestos volátiles son los principales precursores de los vapores condensables generados durante la pirólisis, mientras que un alto contenido de cenizas favorece la formación de residuos sólidos e inhibe la producción de líquidos.

En este estudio, a 700 °C, el rendimiento líquido se mantuvo alrededor del 20 %, lo cual puede atribuirse a una conversión térmica incompleta de la materia orgánica, reflejada también en los elevados rendimientos de sólido (biochar), superiores al 56 %. Este comportamiento ha sido descrito por Ghodke et al. (2021), quienes indican que a temperaturas relativamente bajas predominan reacciones de deshidratación y carbonización, favoreciendo la formación de residuos sólidos con alto contenido de carbono fijo.

Por otro lado, al incrementar la temperatura hasta 800 y 850 °C, se observó una disminución del rendimiento líquido, acompañada de un aumento en la fracción gaseosa, alcanzando valores de hasta 39.5 % a 800 °C. Este fenómeno es consistente con los resultados obtenidos por Inguanzo et al. (2002) quienes reportan que a altas temperaturas y a mayores tiempos de residencia térmica, los vapores orgánicos sufren descomposición secundaria, los cuales favorecen una conversión más completa del sólido generando principalmente CO, CO₂, H₂ y CH₄, lo que incrementa el rendimiento de gas y reduce la cantidad de bioaceite recuperable. En este sentido, el desplazamiento del máximo rendimiento líquido hacia temperaturas más altas (750 °C) en el presente trabajo puede atribuirse a las características particulares de los biosólidos de la PTAR de San Jerónimo, tales como su contenido de cenizas y composición orgánica, así como a las condiciones operativas del reactor. Asimismo, el incremento observado en la fracción gaseosa a temperaturas superiores concuerda con la tendencia descrita por Mcnamara et al. (2016), quienes reportan un aumento de gases como H₂ y CO₂ a altas temperaturas, confirmando que la temperatura y el tiempo de reacción son variables determinantes en la distribución de productos de la pirólisis de biosólidos.

No obstante, el incremento del rendimiento de sólidos a 850 °C (55.81 %) respecto a 750 °C (55.13 %) no obedece a una conversión térmica incompleta, sino a la formación de char secundario ya que a esa temperatura, los fragmentos orgánicos en fase vapor generados por el craqueo sufren reacciones de re-polimerización catalizada por los óxidos metálicos de las cenizas del biosólido (49.70 %), re-depositándose como material carbonoso sólido. La evidencia más directa de este mecanismo es que, en la transición de 800 a 850 °C, el sólido sube (+5.09 puntos porcentuales) mientras el líquido y el gas disminuyen simultáneamente (−2.55 pp cada uno), confirmando que material de ambas fases volátiles retorna a la fase sólida. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Ábrego et al. (2008), quienes señalan que en biosólidos con alto contenido mineral el residuo sólido puede incrementarse por encima de 800 °C como consecuencia de reacciones de repolimerización catalizadas por la fracción inorgánica. Asimismo, Hu & Chen (2025) señalan que la presencia de compuestos inorgánicos en biosólidos urbanos puede promover reacciones de ciclización y condensación a altas temperaturas, contribuyendo al incremento observado en el rendimiento de biochar a 850 °C.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que la mejor temperatura de operación para obtener el mayor rendimiento de producto líquido en la pirólisis de biosólidos se sitúa alrededor de 750 °C, valor que se encuentra dentro del rango reportado en la literatura internacional (450–750 °C), aunque desplazado hacia temperaturas más altas, posiblemente debido a las características específicas del biosólido estudiado, como su contenido de humedad residual, cenizas y composición orgánica.

Finalmente, la concordancia entre los resultados experimentales y los antecedentes bibliográficos valida la selección de las temperaturas de ensayo basada en el análisis termogravimétrico previo, y demuestra que la pirólisis constituye una alternativa técnicamente viable para la valorización energética de los biosólidos, permitiendo la obtención de productos líquidos con potencial de aprovechamiento energético.

En la tabla 19 se muestran comparaciones de características y resultados que tuvieron otras investigaciones similares, con respecto a la nuestra en la pirólisis térmica.

Tabla 19

Comparación de Características y Resultados para la Pirolisis Térmica

Pirólisis térmica							
Autores	Materia Prima	Velocidad de calentamiento (°C/min)	Tipo de Reactor	Temperatura (°C)	Rendimiento de productos líquidos (%)	Rendimiento de productos sólidos (%)	Rendimiento de productos gaseosos (%)
<u>Datos de la presente tesis</u>	Biosólido Clase B	10	Semi continuo	750	21.1	55.1	23.8
(Ghodke et al., 2021)	Biosólidos Clase C	10	Cilíndrico de vidrio de lecho fijo	500	22.4	58.7	18.9

(Álvarez et al., 2016)	Biosólido Clase B	Nd	Lecho cónico en surtidor	500	48.5	46.3	5.2
(Fytili & Zabaniotou, 2008)	Biosólido Clase B	Nd	Lecho fijo	525	30	Nd	Nd
(Inguanzo et al., 2002)	Biosólido Clase B	60	Horizontal de cuarzo	650	≈30–32	≈37–40	≈30–33
(Ábrego et al., 2008)	Lodo de depuradora no digerido	~200	Lecho fijo	600–700	15–30	Nd	Nd

3.7.5. Análisis estadístico

Comparativa en la producción de líquidos, gases y restos sólidos en el proceso de pirolisis.

- **Generación de líquidos en el proceso de pirolisis y diferencia en el porcentaje de generación por tipo de tratamiento térmico.**

Tabla 20

Prueba ANOVA diferencia de producción de líquidos según temperatura usada.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
°T Horno	3	33.59	11.195	3.99	0.05
Error	8	22.47	2.809		
Total	11	56.06			

Nota: R-cuadrado 59.91%

La tabla 20 muestra que la producción de líquidos varía según la temperatura aplicada en el horno durante el proceso, observándose una diferencia con significancia estadística ($F = 3.99$; $p = 0.05$), lo que indica que la temperatura ejerce un efecto importante sobre el rendimiento líquido. El modelo explica aproximadamente el 59.91% de la variabilidad observada ($R^2 = 59.91\%$), lo cual refleja un ajuste moderado. la temperatura influye de manera considerable en la generación de líquidos.

Tabla 21

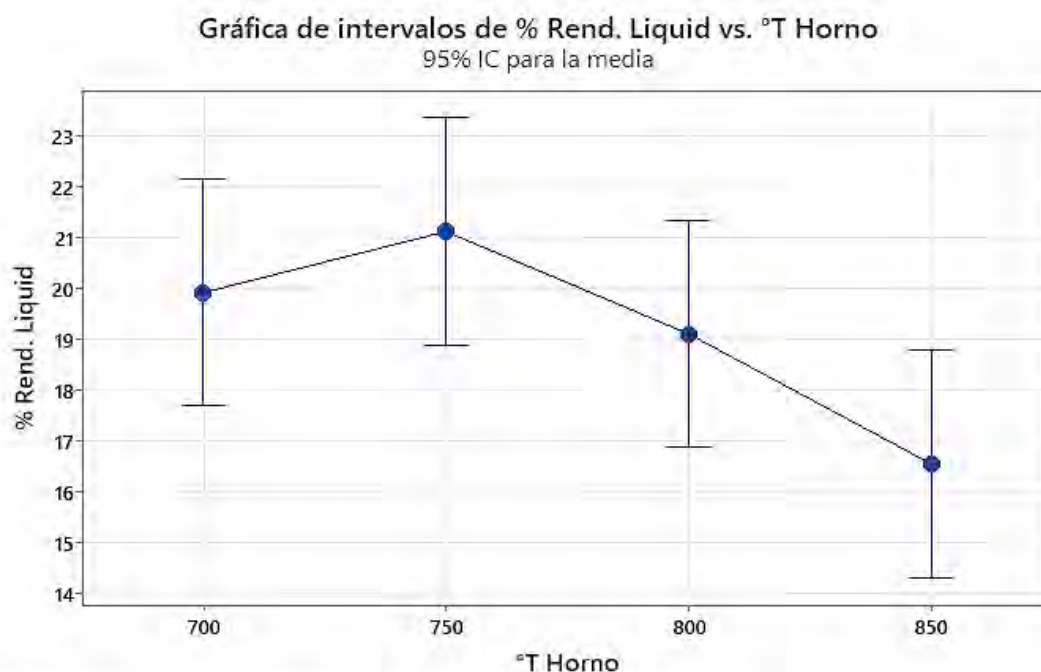
Prueba TUKEY diferencia de medias a pares producción de líquidos

°T Horno	n	Media	Desv.	IC de 95%	Agrupación	
700	3	19.906	0.44	(17.675; 22.137)	A	B
750	3	21.105	0.747	(18.874; 23.336)	A	
800	3	19.09	3.1	(16.860; 21.330)	A	B
850	3	16.542	0.93	(14.311; 18.774)		B

La prueba de comparaciones múltiples de Tukey muestra que existen diferencias en los promedios de producción de líquidos según la temperatura aplicada evidenciando solapamientos entre tratamientos (tabla 21). Las temperaturas de 700 °C y 800 °C comparten simultáneamente los grupos A y B, lo que indica que sus medias no difieren significativamente. La temperatura de 750 °C se ubica en el grupo A, representando el valor promedio más alto y diferenciándose parcialmente de 850 °C, que aparece solo en el grupo B y presenta la menor producción. Que a 750 °C tiende a incrementar la producción de líquidos, mientras que 850 °C la reduce.

Figura 23

Comparación de promedios de producción de líquido según tratamiento térmico

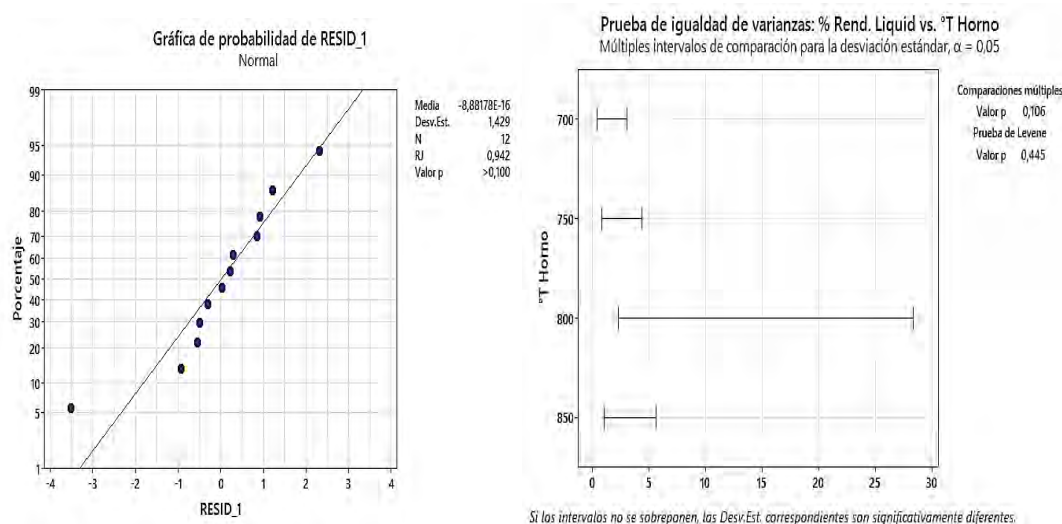


La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

La Figura 23 muestra que la producción de líquidos varía según la temperatura aplicada. Se observa un incremento inicial del rendimiento desde 700 °C hasta alcanzar un mayor rendimiento en 750 °C, seguido de una disminución progresiva a 800 °C y con una caída más pronunciada a 850 °C. Se sugiere que temperaturas moderadas alrededor de 750 °C favorecen una mayor generación de productos líquidos y también las reacciones de desvolatilización de la materia orgánica que están presentes en los biosólidos, generando una mayor cantidad de compuestos condensables que dan lugar al bioaceite. Sin embargo, al incrementar la temperatura por encima de este valor, predominan las reacciones de craqueo térmico secundario, en las cuales los compuestos líquidos de mayor peso molecular se descomponen en gases no condensables, lo que reduce el rendimiento de líquidos y aumenta la fracción gaseosa. Asimismo, la disminución del rendimiento sólido con el incremento de la temperatura evidencia una mayor conversión del material, lo cual es consistente con el comportamiento típico de procesos de pirólisis de biomasa.

Figura 24

Verificación de supuesto de normalidad y homocedasticidad en la diferencia de producción de líquidos



Con p valor de $0.10 > 0.05$ en prueba de normalidad de Shapiro Wilks muestra que los residuos del modelo presentan distribución normal indicando que el modelo es adecuado de igual manera para la prueba de Levene con un valor p de $0.445 > 0.05$ indicando que las varianzas de las muestras son iguales (figura 24).

- **Sólidos conservados en el proceso de pirolisis y diferencia en el porcentaje de conservado por tipo de tratamiento térmico.**

Tabla 22

Prueba ANOVA diferencia en la conservación de solidos según temperatura usada

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
°T Horno	3	79.27	26.424	3.05	0.092
Error	8	69.36	8.67		
Total	11	148.63			

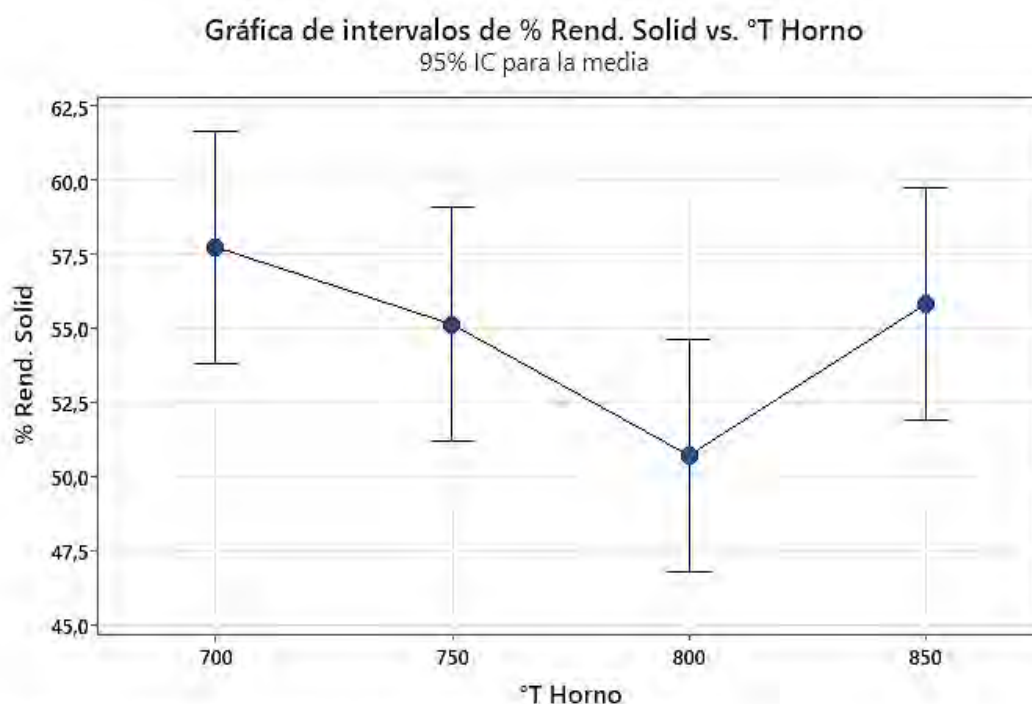
Nota: R-cuadrado 53,33%

La tabla 22 muestra que la cantidad de solidos conservados no varía según la temperatura aplicada en el horno, con valores en la prueba ANOVA de ($F = 3.05$; $p = 0.092$), lo que indica que la temperatura no ejerce un efecto importante sobre la cantidad de solidos conservados. El modelo explica aproximadamente el 53.33% de la variabilidad observada ($R^2 = 53.33\%$).

Tabla 23*Prueba TUKEY diferencia de medias a pares*

°T Horno	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%	Agrupación
700	3	57.735	1.199	(53.814; 61.655)	A
750	3	55.130	2.120	(51.210; 59.050)	A
800	3	50.720	5.130	(46.790; 54.640)	A
850	3	55.814	1.559	(51.893; 59.734)	A

La prueba de comparaciones múltiples de Tukey muestra que no existen diferencias en los promedios del porcentaje de sólido conservado según la temperatura aplicada dado que todas las letras conforman un único grupo A (tabla 23).

Figura 25*Comparación de promedios de conservación de sólidos según tratamiento térmico*

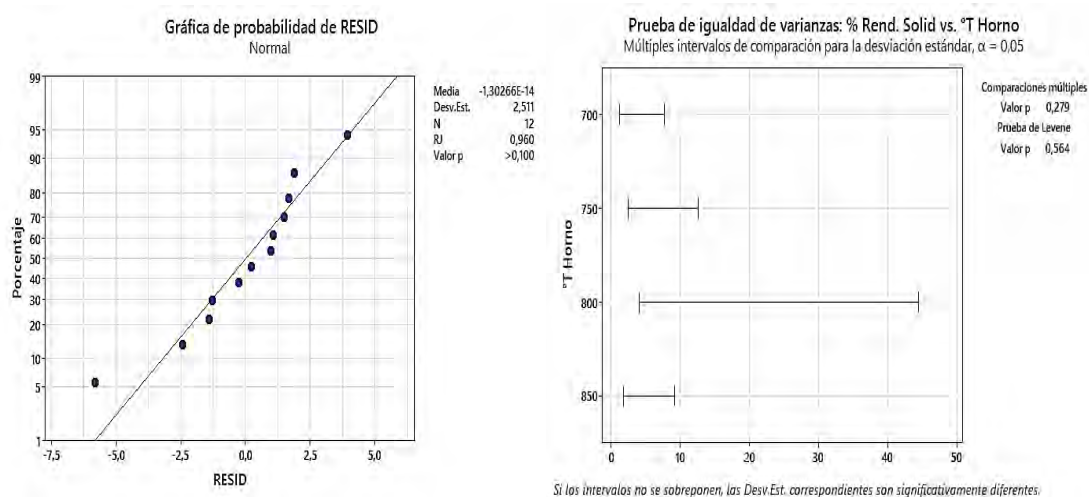
La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

A pesar de no existir diferencias estadísticamente significativas, la Figura 25 evidencia un comportamiento no monótono: el menor rendimiento de sólidos se registra a 800 °C (50.72 %), mientras que a 850 °C se produce un rebote (55.81 %), atribuible a la formación de char secundario por re-polimerización de vapores orgánicos pesados catalizada por la fracción mineral del biosólido. Este fenómeno refuerza la selección de

750 °C como temperatura óptima, donde el rendimiento sólido es mínimo y el rendimiento líquido alcanza su valor máximo (21.10 %).

Figura 26

Verificación de supuesto de normalidad y homocedasticidad en la diferencia de conservación de sólidos



Con p valor de $0.10 > 0.05$ en prueba de normalidad de Shapiro Wilks muestra que los residuos del modelo presentan distribución normal indicando que el modelo es adecuado de igual manera para la prueba de Levene con un valor p de $0.564 > 0.05$ indicando que las varianzas de las muestras son iguales (figura 26).

- **Generación de gases en el proceso de pirólisis y diferencia en el porcentaje de producción por tipo de tratamiento térmico.**

Tabla 24

Prueba ANOVA diferencia en la generación de gases según temperatura usada

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
°T Horno	3	115.5	38.5	1.99	0.195
Error	8	155	19.37		
Total	11	270.4			

Nota: R-cuadrado 42.70%

La tabla 24 muestra que la producción de gases varía según la temperatura aplicada en el horno durante el proceso, observándose una diferencia no significancia

estadística ($F = 1.99$; $p = 0.195$), lo que indica que la temperatura no ejerce una diferencia notable en la producción de gases.

Tabla 25

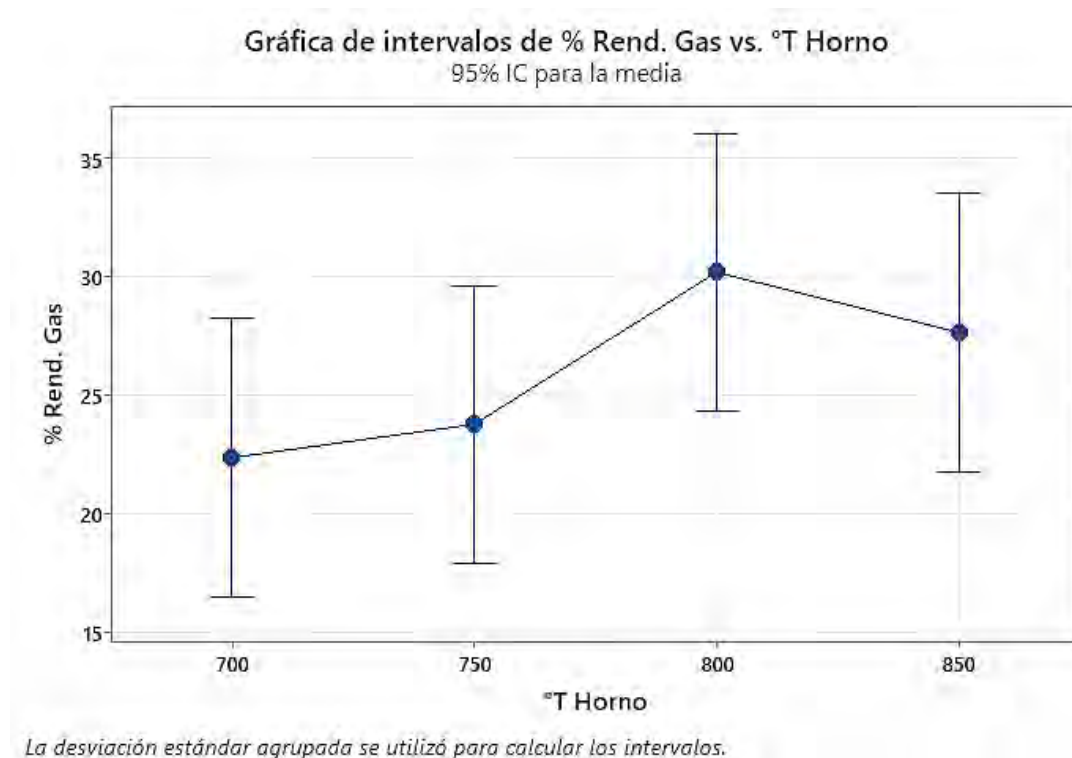
Prueba TUKEY diferencia de medias a pares

°T Horno	N	Media	Desv.	IC de 95%	Agrupación
700	3	22.36	0.874	(16.500; 28.219)	A
750	3	23.77	2.600	(17.910; 29.630)	A
800	3	30.19	8.090	(24.330; 36.050)	A
850	3	27.64	2.110	(21.780; 33.500)	A

La prueba de comparaciones múltiples de Tukey muestra que no existen diferencias en los promedios del porcentaje de gases producidos según la temperatura aplicada dado que todas las letras conforman un único grupo A (tabla 25).

Figura 27

Comparación de promedios de conservación de sólidos según tratamiento térmico

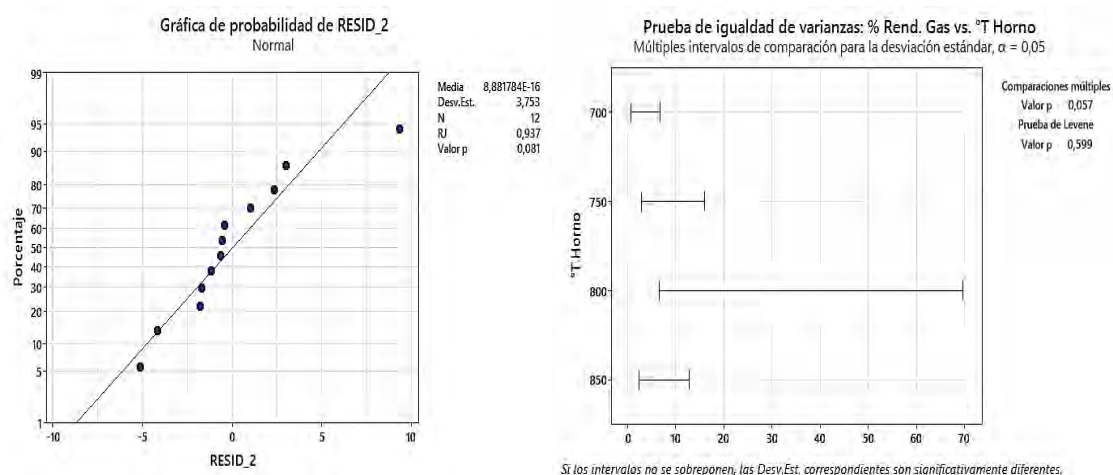


La Figura 27 muestra que el porcentaje de gases producidos varía según la temperatura aplicada. A pesar de no existir diferencias significativas se puede observar

que a 800 °C se genera muchos más gases seguido de 850 °C en temperaturas bajas no se genera tanto porcentaje de gases.

Figura 28

Verificación de supuesto de normalidad y homocedasticidad en la diferencia de producción de gases



Con p valor de $0.081 > 0.05$ en prueba de normalidad de Shapiro Wilks muestra que los residuos del modelo presentan distribución normal indicando que el modelo es adecuado de igual manera para la prueba de Levene con un valor p de $0.599 > 0.05$ indicando que las varianzas de las muestras son iguales (figura 28).

3.7.6. Caracterización del producto líquido obtenido por pirólisis

a) Propiedades físicas del producto líquido

Se realizó la caracterización fisicoquímica del producto líquido obtenido a mayor rendimiento que fue a la temperatura de 750 °C y velocidad de calentamiento de aproximadamente 10 °C/min, esto permite evaluar su potencial como combustible alternativo y compararlo con bioaceites reportados en la literatura para la pirólisis de biosólidos. Los parámetros analizados incluyen poder calorífico, viscosidad, densidad, contenido de agua, punto de inflamación, punto de fluidez y gravedad API, los cuales son determinantes para establecer su calidad energética y su posible aplicación industrial. En la siguiente tabla 26 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 26

Propiedades físicas del producto líquido obtenidos mediante laboratorio para la caracterización de la pirólisis de biosólidos

Producto líquido		
Ensayo	Método de ensayo	Resultados
		750 °C
Poder calorífico bruto (MJ/kg)	ASTM D 240	18.549
Viscosidad (cSt)	ASTM D 445	47.718
Gravedad API (°API)	-	6.99
Agua por destilación (%v/v)	ASTM D95 ADAPTADO	30
Densidad (kg/m3)	-	1021.74
Punto de Inflamación Pensky-Martens, (°C)	ASTM D93	31.5
Punto de Fluidez, (°C)	ASTM D97	12
Destilación ASTM (°C)	ASTM D86	
	10%	94
	30%	99
	50%	101
	70%	205
	80%	210
	83%	220

Los resultados experimentales indican que el producto líquido presenta características típicas de un bioaceite derivado de biosólidos, con poder calorífico moderado, alta densidad y viscosidad elevada. Comparado con los estudios de Álvarez et al. (2016) y Ghodke et al. (2021), los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos reportados, lo que confirma la coherencia de los resultados experimentales. No obstante, sus propiedades fisicoquímicas sugieren que el producto no puede emplearse directamente como sustituto del diésel, sino que requeriría procesos de mejora (upgrading), refinamiento o mezcla para optimizar su estabilidad y desempeño energético.

Una de las características que más afectan la calidad del producto líquido obtenido es el elevado contenido de agua (30 % vol.), lo cual es considerablemente alto en comparación con bioaceites obtenidos por pirólisis rápida (15–30 %) y superior al de combustibles fósiles convencionales. De acuerdo a lo descrito por Fonts et al. (2009), el alto contenido de agua en bioaceites de biosólidos se debe principalmente a la humedad residual del material inicial, a las reacciones de deshidratación durante la pirólisis, la formación de agua como producto secundario de reacciones de desoxigenación y la condensación conjunta de vapor de agua con compuestos orgánicos ligeros.

De acuerdo con Bridgwater (2012), un alto contenido de agua reduce el poder calorífico y afecta la estabilidad del combustible, sin embargo se encuentra dentro del rango reportado para bioaceites derivados de biosólidos, aunque en el límite superior y este valor coincide con lo reportado por Álvarez et al. (2016) quienes determinaron 20–30 % para pirólisis rápida de biosólidos y hasta 40 % en algunos sistemas de calentamiento lento de acuerdo con Ghodke et al. (2021).

En la siguiente tabla 27 se muestran los resultados del ensayo de Destilación ASTM D86 del bioaceite obtenido por pirolisis de biosólidos comparado con otros combustibles comerciales.

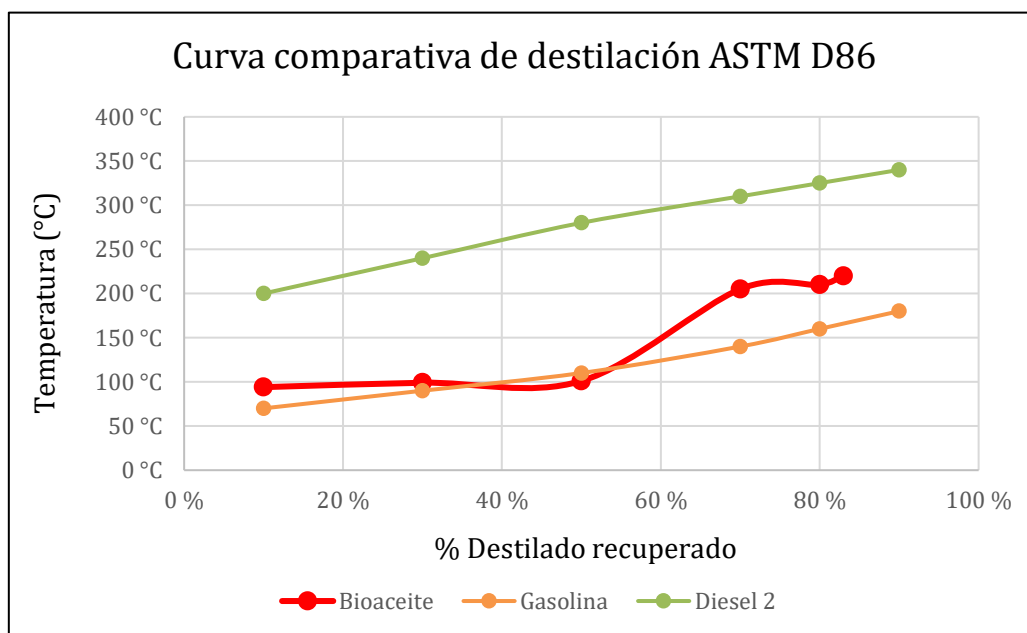
Tabla 27

Resultados del ensayo de Destilación ASTM D86 del bioaceite obtenido, Gasolina regular y Diésel 2

% Destilado	Bioaceite Temp (°C)	Gasolina Temp (°C)	Diesel 2 Temp (°C)
10	94	70	200
30	99	90	240
50	101	110	280
70	205	140	310
80	210	160	325
90	-	180	340

Figura 29

Curva de destilación ASTM D86 del bioaceite en comparación con Gasolina regular y Diésel 2



En la figura 29, la curva de destilación ASTM D86 del bioaceite obtenido por pirólisis de biosólidos evidenció un comportamiento intermedio entre la gasolina regular y el diésel 2, lo que indica la presencia de compuestos ligeros y fracciones de mayor peso molecular. Los primeros porcentajes destilados (10–50 %) se obtuvieron a temperaturas relativamente bajas (94–101 °C), sugiriendo la presencia de compuestos volátiles

similares a fracciones ligeras de combustibles comerciales. Sin embargo, a partir del 70 % destilado se observó un incremento significativo de la temperatura (205–220 °C), asociado a la presencia de compuestos más pesados y oxigenados característicos de los bioaceites derivados de biomasa y biosólidos.

De dicho ensayo de Destilación ASTM D86 a 760 mmHg y el cual a través de sus resultados aplicados al software de uso gratuito DWSIM se pudo estimar el índice de cetano y densidad que son propiedades complementarias, como lo propuesto por Ramos et al. (2023), el cual estima las características mencionadas, por medio de curvas de destilación, estableciendo el número de pseudocomponentes y las propiedades termodinámicas necesarias para realizar dicha estimación. Las características estimadas para esta investigación se presentan en la tabla 28.

Tabla 28

Estimación de propiedades fisicoquímicas utilizando las curvas de destilación de la ASTM D86 en el software DWSIM

Biosólidos-750 °C	
Propiedades del bioaceite	Resultado final
Índice de cetano	7.74485
Densidad a 60 °F (kg/m³)	1002.88

El índice de cetano estimado mediante simulación (7.74) evidencia una muy baja calidad de ignición del producto líquido, ubicándose muy por debajo de los valores requeridos para combustibles diésel comerciales (45–55). Este comportamiento es consistente con la naturaleza altamente oxigenada y aromática del bioaceite derivado de biosólidos, así como con su elevado contenido de agua y baja gravedad API. Estudios previos en pirólisis de lodos reportan valores de cetano entre 10 y 20 para bioaceites crudos, lo que confirma que el producto obtenido presenta características típicas de un bioaceite sin upgrading y no es apto para uso directo en motores de encendido por compresión.

Los resultados obtenidos mediante simulación en el software DWSIM muestran que la densidad es una propiedad global del fluido, relacionada principalmente con su masa y volumen, por lo que puede ser estimada con mayor precisión incluso en mezclas complejas como el bioaceite. Por su parte, el índice de cetano, aunque es una propiedad calculada, permite evaluar de manera aproximada la calidad de ignición del producto líquido, siendo un parámetro relevante en el análisis de su potencial energético

Tabla 29

Comparación de la densidad obtenida en el laboratorio y estimada en el software

DWSIM

Propiedad	Experimental	DWSIM	Error (%)
Densidad (kg/m ³)	1021.7	1002.88	1.84%

En la densidad, se obtuvo una buena concordancia entre el valor experimental (1021.7 kg/m³) y el estimado mediante DWSIM (1002.88 kg/m³), con un error relativo de 1.84 % (tabla 29). Este bajo porcentaje de error indica que el modelo termodinámico empleado por el simulador es capaz de predecir adecuadamente esta propiedad.

3.7.7. Discusión acerca de la caracterización del producto líquido

Una vez efectuado el análisis estadístico del rendimiento de los productos líquidos, estos se contrastan en la tabla 30 con otros productos líquidos derivados de biomasa, con el objetivo de verificar si cumplen con las especificaciones mínimas necesarias para su uso como combustible directo. En caso de no satisfacer dichos requisitos, será necesario aplicar tratamientos adicionales para mejorar sus propiedades y calidad.

Por otro lado, en la tabla 31 se presenta una comparación de las propiedades obtenidas para el producto líquido con los resultados reportados en otras investigaciones, lo que permite evaluar su desempeño en relación con estudios previos.

a) Características fisicoquímicas del producto líquido

De acuerdo con el informe de los análisis físico-químicos realizados al producto líquido obtenido de la pirólisis de los biosólidos, se lleva a cabo una comparación de sus resultados con los productos líquidos obtenidos de diferentes biomásas, como el bioaceite

de caña de azúcar, bio aceite de residual de madera y bio aceite de caucho vulcanizado. Esta comparación se presenta en la tabla 30.

La siguiente tabla 30 fue elaborada con la información adaptado de Alarcón & Viltres (2022), Mancheno et al. (2017), Chukwuneke et al. (2019).

Tabla 30

Comparación de resultados de las propiedades fisicoquímicas del producto líquido obtenido con las propiedades de los productos líquidos (bioaceites) obtenidos de diferentes biomásas

Ensayo	Método de ensayo	Producto líquido obtenido	Bio Aceite obtenido de caña de azúcar	Bio Aceite obtenido de caucho vulcanizado	Bio Aceite obtenido de madera residual
Poder Calorífico Bruto (MJ/Kg)	ASTM D-240	18.549	20.20	Nd	29.2-32.2
Viscosidad (cSt)	ASTM D-445	47.718	~ 2000	1.26	40-100
Gravedad API (°API)	-	7.23	Nd	23.87	Nd
Densidad (g/cm³)	-	1.02	1.4	0.88	0.8-0.91
Punto de inflamación (°C)	ASTM D-93	31.5	Nd	20.5	Nd

Los resultados obtenidos evidencian que el bio aceite producido por pirólisis de biosólidos provenientes de una PTAR presenta propiedades fisicoquímicas comparables a las de bioaceites derivados de otras biomásas, aunque con diferencias asociadas a la naturaleza composicional del residuo de origen.

Al realizar la comparación se observa que el poder calorífico (18.549 MJ/kg) es inferior al reportado para bioaceites de madera residual y ligeramente menor que el de

caña de azúcar, lo que se atribuye al mayor contenido de compuestos oxigenados y fracción inorgánica presente en los biosólidos. No obstante, el valor obtenido se encuentra dentro del rango típico de bio aceites de pirólisis, confirmando su potencial como combustible alternativo.

En términos reológicos, la viscosidad se encuentra dentro del rango típico de bioaceites lignocelulósicos, lo que favorece su manejo, bombeo y potencial aplicación en sistemas de combustión, a diferencia de otros bioaceites con viscosidades considerablemente más elevadas. En comparación con otros biocombustibles la viscosidad cinemática del producto líquido obtenido (47.718 cSt), es considerablemente superior al rango típico del diésel ($\approx 2\text{--}4$ cSt a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$) y también mayor que el biodiésel ($\approx 4\text{--}6$ cSt a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Esta elevada viscosidad puede asociarse a la presencia de compuestos de alto peso molecular, estructuras tipo cerosas y posibles reacciones de condensación entre compuestos oxigenados durante el almacenamiento. Desde el punto de vista operativo, una viscosidad elevada puede generar mayores pérdidas de presión en sistemas de bombeo e inyección, afectando la atomización del combustible y la eficiencia de combustión.

En cuanto a la densidad (1.02 g/cm^3), el bioaceite de biosólidos muestra un comportamiento más cercano al de líquidos pesados, superando los valores típicos de bioaceites de madera ($0.8\text{--}0.91\text{ g/cm}^3$) y caucho vulcanizado (0.88 g/cm^3). Esta característica confirma una mayor proporción de compuestos polares y oxigenados, lo que implica menor similitud con combustibles fósiles convencionales y la posible necesidad de procesos de upgrading para mejorar su calidad energética.

El punto de inflamación indica que el bioaceite posee adecuada fluidez a bajas temperaturas y un comportamiento inflamable característico de los líquidos obtenidos por pirólisis. El punto de inflamación ($31.5\text{ }^{\circ}\text{C}$), el valor es significativamente menor que el del biodiésel (usualmente $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$) y también inferior al mínimo típico del diésel ($>52\text{ }^{\circ}\text{C}$). Este resultado indica la presencia de fracciones ligeras y compuestos volátiles formados durante la pirólisis. Desde el punto de vista de seguridad, este valor implica mayor riesgo en almacenamiento y manipulación, ya que el combustible puede generar vapores inflamables a temperaturas cercanas al ambiente.

De manera integral, los resultados demuestran que el bio aceite derivado de biosólidos posee propiedades fisicoquímicas típicas de los bio aceites de pirólisis, con un comportamiento energético y reológico intermedio respecto a otras biomasas. Aunque su poder calorífico es menor que el de fuentes lignocelulósicas, presenta características que permiten su valorización energética, especialmente en aplicaciones industriales de combustión directa o como materia prima para procesos de mejoramiento catalítico.

En consecuencia, la pirólisis de biosólidos no solo constituye una alternativa viable para la gestión sostenible de residuos de PTAR, sino que también permite la obtención de un producto líquido con potencial energético, cuya calidad puede optimizarse mediante estrategias de refinamiento posteriores.

Tabla 31

Comparación de resultados de las propiedades del producto líquido con investigaciones realizadas

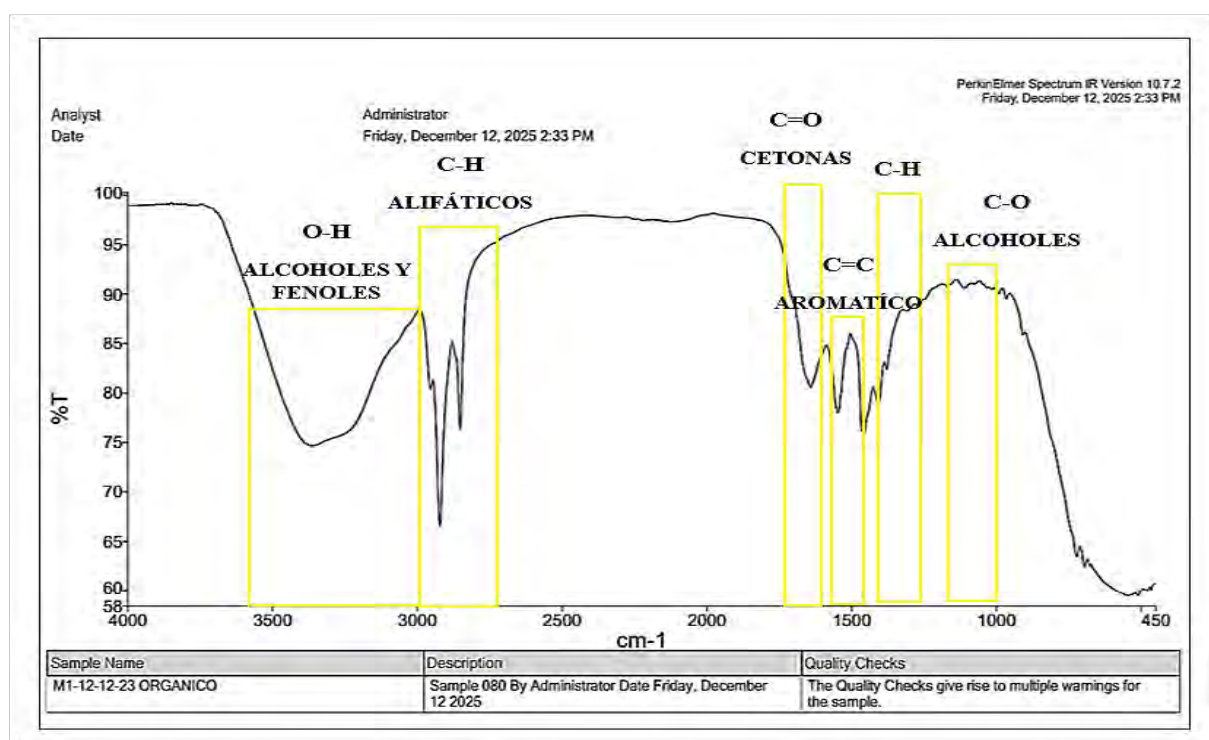
Ensayo	Producto líquido (investigación)	Producto líquido (Alvarez et al., 2016)	Producto líquido (Ghodke et al., 2021)
Temperatura de operación (°C)	750	500	500
Duración (h)	3	1	1
Poder Calorífico Bruto (MJ/Kg)	18.549	18.8	16.531
Viscosidad (cSt)	47.718	28	24.62
Densidad (g/cm³)	1.02	1.05	0.917
Contenido de agua (% v/v)	30	23	12.3
Rendimiento de productos líquidos (%)	21.1	48.5	22.4
Velocidad de calentamiento (°C/min)	10	Nd	10

Finalmente concluimos que el bio-aceite obtenido mediante pirólisis presenta ciertos componentes que limitan su uso como combustible de transporte. Estos incluyen altos contenidos de agua, oxígeno y cenizas, así como una alta viscosidad, corrosividad y bajo poder calórico. Estos factores hacen que el bio-aceite sea altamente oxigenado y químicamente inestable. Para su utilización directa en el sector del transporte, es necesario someterlo a procesos de transformación que reduzcan el contenido de oxígeno y eliminen los residuos, mejorando así su calidad y facilitando su uso (Alarcón & Viltres, 2022).

b) Análisis FTIR

Figura 30

Espectrometría del producto liquido obtenido a 750°C



La Figura 30 presenta el espectro FTIR correspondiente al bioaceite obtenido mediante la pirólisis de biosólidos provenientes de la PTAR de San Jerónimo (Cusco) a una temperatura de 750 °C. En términos generales, el espectro evidencia una importante transformación de la composición química del producto líquido, caracterizada por una disminución de grupos funcionales altamente oxigenados y un incremento relativo de

estructuras hidrocarbonadas y aromáticas, comportamiento típico de procesos de pirólisis a temperaturas elevadas.

Una de las características más evidentes es la presencia de una banda ancha entre aproximadamente 3600 y 3200 cm^{-1} , atribuida a las vibraciones de estiramiento de los enlaces O–H correspondientes a alcoholes y compuestos fenólicos. Aunque esta señal continúa siendo visible, su intensidad es relativamente moderada, lo que sugiere una reducción en el contenido de grupos hidroxilo respecto a bioaceites obtenidos a temperaturas inferiores. Este comportamiento puede explicarse por las reacciones de deshidratación y desoxigenación que se intensifican durante la pirólisis a $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, favoreciendo la eliminación de agua y la disminución progresiva de compuestos oxigenados. Resultados similares fueron descritos por Ghodke et al. (2021) y Wei et al. (2021), quienes observaron una reducción de las bandas O–H conforme aumenta la temperatura de pirólisis debido a la ruptura de enlaces oxigenados y la formación de productos más estables.

En la región comprendida entre 2950 y 2850 cm^{-1} se distinguen picos bien definidos asociados al estiramiento de los enlaces C–H de grupos alifáticos $-\text{CH}_3$ y $-\text{CH}_2-$. La intensidad de estas bandas indica la presencia de hidrocarburos saturados y fragmentos alifáticos generados por el craqueo térmico de macromoléculas presentes en los biosólidos, como lípidos, proteínas y compuestos orgánicos complejos. A temperaturas cercanas a $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, las reacciones de ruptura de enlaces carbono-carbono favorecen la formación de moléculas de menor peso molecular, incrementando la proporción de hidrocarburos ligeros en la fase líquida, fenómeno ampliamente documentado en estudios de pirólisis rápida de biomasa y lodos residuales (Ghodke et al., 2021).

Asimismo, se observa una absorción importante alrededor de 1700 cm^{-1} , correspondiente al estiramiento de grupos carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) característicos de cetonas, aldehídos y posiblemente ácidos carboxílicos o ésteres. Sin embargo, la intensidad relativamente limitada de esta banda respecto a otras regiones del espectro sugiere que una fracción significativa de estos compuestos ha experimentado procesos de descarboxilación y descarboxilación, liberando CO y CO_2 y reduciendo el contenido global de oxígeno en el bioaceite. Syed et al. (2017), reportaron un comportamiento similar en bioaceites producidos a altas temperaturas, indicando que la disminución de

señales carbonílicas refleja un mayor grado de conversión térmica y una mejora relativa de la calidad energética del producto líquido.

Entre 1600 y 1500 cm^{-1} aparecen bandas asociadas a las vibraciones del esqueleto C=C de anillos aromáticos, indicando una presencia significativa de compuestos aromáticos en el bioaceite. La formación de estas estructuras puede atribuirse a reacciones secundarias de ciclización, condensación y aromatización de radicales libres generados durante la degradación térmica de la materia orgánica. El incremento de la aromaticidad con el aumento de la temperatura ha sido señalado por Wei et al. (2021), quienes demostraron que temperaturas superiores a 700 °C favorecen la conversión de cadenas alifáticas y compuestos oxigenados hacia estructuras aromáticas más condensadas y termoestables.

En la región comprendida aproximadamente entre 1250 y 1000 cm^{-1} se identifican bandas relacionadas con el estiramiento de enlaces C–O, característicos de alcoholes, fenoles, éteres y otros compuestos oxigenados. Aunque estas señales permanecen presentes, su intensidad moderada confirma que parte importante de las funciones oxigenadas originales fue eliminada durante el tratamiento térmico. La persistencia de estas bandas indica que el proceso de pirólisis no conduce a una desoxigenación completa y que el bioaceite conserva una fracción de compuestos fenólicos y oxigenados derivados principalmente de la descomposición de componentes orgánicos presentes en los biosólidos.

Por debajo de 900 cm^{-1} se observan señales atribuibles a deformaciones fuera del plano de enlaces C–H aromáticos, las cuales suelen asociarse con anillos bencénicos sustituidos y compuestos policíclicos aromáticos. La presencia de estas bandas respalda la interpretación de que las altas temperaturas promueven procesos de condensación molecular y aumento de la aromaticidad del bioaceite (Ghodke et al., 2021).

En conjunto, el espectro FTIR indica que el bioaceite obtenido a 750 °C presenta una mezcla compleja de grupos funcionales que incluyen hidroxilos (O–H), hidrocarburos alifáticos (C–H), compuestos carbonílicos (C=O), estructuras aromáticas (C=C) y enlaces C–O asociados con alcoholes, fenoles y éteres. Es importante señalar que, aunque el FTIR permite identificar estas familias funcionales, no confirma por sí

solo la presencia específica de ésteres o compuestos nitrogenados, cuya identificación requiere técnicas complementarias como GC-MS o espectrometría de masas.

Desde una perspectiva comparativa, los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Ghodke et al. (2021), quienes encontraron que el aumento de la temperatura de pirólisis reduce la abundancia de grupos hidroxilo y carbonílicos mientras incrementa la formación de compuestos hidrocarbonados. Del mismo modo, Syed et al. (2017) observaron que la degradación térmica de lodos residuales favorece la disminución de especies oxigenadas y el enriquecimiento de estructuras aromáticas debido a reacciones de descarbonilación y condensación. Por su parte, Wei et al. (2021) concluyeron que temperaturas elevadas promueven una mayor aromatización del bioaceite y una composición química más rica en hidrocarburos, resultados que concuerdan con el predominio de las bandas aromáticas y alifáticas observado en el presente estudio.

En consecuencia, el análisis FTIR sugiere que la pirólisis de biosólidos a 750 °C produce un bioaceite con un grado significativo de desoxigenación y una mayor proporción relativa de compuestos aromáticos y alifáticos estables, reflejando una transformación química consistente con los mecanismos de craqueo, ciclización y condensación descritos en la literatura para procesos de pirólisis a altas temperaturas. Esta evolución estructural puede contribuir a mejorar ciertas propiedades energéticas del bioaceite, aunque la confirmación de su composición molecular específica requiere análisis instrumentales complementarios.

CONCLUSIONES

- Se pudo evaluar y determinar el rendimiento de productos líquidos obtenidos por pirólisis de biosólidos utilizando un reactor semicontinuo.
- La caracterización de las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los biosólidos provenientes de la PTAR de San Jerónimo, Cusco, permitió determinar parámetros fundamentales para evaluar su viabilidad como materia prima en procesos de pirólisis para la obtención de biocombustible líquido. Los resultados obtenidos demuestran que los biosólidos presentan características biológicas como microorganismo aerobios de 145 UFC/g, coliformes totales de 43 NMP/g y hongos de 58 UFC/g y características fisicoquímicas como la humedad 2.024%, cenizas de 49.696%, material volátil de 44.989%, carbón fijo de 2.793%, poder calorífico de 10.637 MJ/kg y densidad aparente de 0.7139 g/cm³; estos resultados permiten su valorización energética mediante pirólisis, aunque el elevado contenido de cenizas podría influir en el rendimiento y calidad del biocombustible líquido obtenido.
- Los resultados muestran que la temperatura influye de manera importante en el rendimiento de los productos líquidos obtenidos durante la pirólisis. Las temperaturas intermedias, 750 °C, generan el mayor porcentaje de líquidos, mientras que temperaturas más elevadas, como 850 °C, reducen significativamente este rendimiento. La prueba ANOVA arrojó un valor p de significancia ($p = 0.05$) confirmando que la temperatura actúa como un factor determinante en la producción de líquidos, siendo más eficiente en rangos moderados y menos favorable en niveles elevados.
- Se logró determinar las características fisicoquímicas de los productos líquidos obtenidos a mayor rendimiento mediante las normas ASTM, concluyendo que el producto líquido corresponde a un bioaceite crudo. Este presentó una densidad de 1.0217 g/cm³, viscosidad cinemática de 47.718 cSt, contenido de agua de 30 % v/v, poder calorífico de 18.5 MJ/kg, punto de inflamación de 31.5 °C y punto de fluidez de 12 °C, valores que evidencian que no cumple con los parámetros requeridos para su uso directo en motores de combustión interna. No obstante, presenta potencial como materia prima energética, siempre que sea sometido a procesos de acondicionamiento o mejoramiento para refinación o formulación de

mezclas combustibles que permitan adecuar sus propiedades a los estándares técnicos establecidos.

RECOMENDACIONES

- Para uno de los pretratamientos de los biosólidos, para poder disminuir la humedad y microorganismos de la materia prima con mejor eficiencia, es recomendable usar un equipo de autoclave, puesto que combinan la eliminación de bacterias, virus y esporas con un ciclo final de secado, lo que reduce la carga de patógenos y la humedad simultáneamente. de esta manera se mejora la eficiencia del proceso de pirólisis, incrementa la calidad del producto líquido y reduce la variabilidad experimental.
- Se recomienda que futuras investigaciones tomen como base los resultados obtenidos en el presente estudio y profundicen en el aprovechamiento del producto líquido obtenido, el cual corresponde a un bioaceite de pirólisis crudo, caracterizado por poseer un contenido energético intermedio y una estabilidad química limitada; por ello, su mejor aplicación se encuentra en procesos de refinación, hidrotratamiento o en procesos de upgrading catalítico, donde puede alcanzar su mayor potencial y rendimiento.
- Se recomienda realizar estudios adicionales de caracterización del residuo sólido (biocarbón) obtenido durante el proceso de pirólisis, con el fin de evaluar su posible valorización y aprovechamiento. Para ello, sería conveniente analizar propiedades fisicoquímicas como el contenido de carbono fijo, área superficial, composición elemental, presencia de metales pesados y capacidad de adsorción. La caracterización detallada permitiría determinar su potencial aplicación en diferentes ámbitos, tales como enmienda para suelos, material adsorbente para el tratamiento de aguas contaminadas o como combustible sólido. Asimismo, se sugiere evaluar su estabilidad ambiental y posibles riesgos asociados a la presencia de compuestos inorgánicos o metales provenientes de los biosólidos originales

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ábrego, J., García, G., Gonzalo, A., Cordero, T., & Rodríguez-Mirasol, J. (2008). Influence Of Temperature And Heating Rate In The Fixed Bed Pyrolysis Of Two Types Of Sewage Sludge. *Thermochemical Processes Group (GPT)*, 1.
- Agencia, L., Unidos, E., Part, C. F. R., Part, C. F. R., Este, B., Unidos, E., & Epa, L. (2002). *Indicaciones para controlar los riesgos potenciales que corren los trabajadores expuestos a los biosólidos de clase B*. 149(1), 4–7.
- Alarcón-zayas, A., & Viltres-rodriguez, R. (2022). *Introducción*. 34(1), 131–158.
- Alvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Artetxe, M., Barbarias, I., Arregi, A., Bilbao, J., & Olazar, M. (2016). Characterization of the bio-oil obtained by fast pyrolysis of sewage sludge in a conical spouted bed reactor. *Fuel Processing Technology*, 149, 169–175. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.04.015>
- Aracil, I. (2008). *Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP)*. Universidad de Alicante.
- Aragonez, M. P. (2015). Análisis Termogravimétrico de la Pirólisis de Biosólidos de la planta de tratamiento de agua residual El Salitre. In *Facultad de Ingenieria*. Universidad Nacional de Colombia.
- ASTM. (2015). *ASTM D7582-15, Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis*. American Society for Testing and Materials. <https://doi.org/10.1520/D7582-15>
- ASTM. (2018a). *Standard Test Method for Water in Petroleum Products and Bituminous Materials by Distillation (ASTM D95-18)*. ASTM International.
- ASTM. (2018b). *tandard Test Method for Pour Point of Petroleum Products (ASTM D97-17b)*. ASTM International.
- ASTM. (2019a). *ASTM D240-19: Standard test method for heat of combustion of liquid hydrocarbon fuels by bomb calorimeter*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0240-19>
- ASTM. (2019b). *ASTM E873-82(2019), Standard test method for bulk density of densified particulate biomass fuels*. <https://doi.org/10.1520/E0873-82R19>

- ASTM. (2019c). *Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester (ASTM D93-19)*. ASTM International,.
- ASTM. (2023). *ASTM D86-23: Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products and Liquid Fuels at Atmospheric Pressure*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0086-23AE02>
- ASTM. (2024). *ASTM D445-24: Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0445-24>
- Balat, M., Balat, M., Kirtay, E., & Balat, H. (2009). Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals . Part 1 : Pyrolysis systems. *Energy Conversion and Management*, 50(12), 3147–3157. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.08.014>
- Barzola, F., & Reyes, W. (2019). *Escuela Superior Politecnica del Litoral Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas Diseño básico de una planta piloto de pirólisis para valorización de lodos Proyecto Integrado Previo la obtención del Título de : Ingeniero Químico Presentado por : Fra.*
- Bonney, P., Kearnes, M., & Rickards, L. (2025). Responsible biosolids reuse : A critical reassessment of public engagement in the wastewater sector. *Journal of Environmental Management*, 387(May), 125556. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125556>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Castañeda Nández, H. J., & López Velázquez, R. (2012). *Los Biosólidos, una oportunidad en la agricultura.*
- Chukwuneke, J. L., Ewulonu, M. C., Chukwujike, I. C., & Okolie, P. C. (2019). Physico-chemical analysis of pyrolyzed bio-oil from swietenia macrophylla (mahogany) wood. *Heliyon*, 5(6), e01790. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01790>
- Conesa, J. A., Font, R., Fullana, A., Martín-Gullón, I., Aracil, I., Gálvez, A., Moltó, J., & Gómez-Rico, M. (2009). Comparison between emissions from the pyrolysis and combustion of different wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 84, 95–

102. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.11.022>
- D.S. 015-2017-VIVIENDA Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2017). Decreto supremo que aprueba el Reglamento para el reaprovechamiento de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Diario Oficial El Peruano*, 32–40. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-015-2017-VIVIENDA.pdf>
- Energiminas. (2025). *Producción de petróleo registra caída de 19% con 36.5 mil barriles al cierre de noviembre*.
- EPS SEDACUSCO S.A. (2022). *Memoria SEDACUSCO 2022.pdf* (p. 92). chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.sedacusco.com/transparencia/memoria/2022.pdf>
- Espinoza, J., & Santos de la Cruz, E. (2021). *Innovación en la gestión de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico en Lima- Perú*. 24, 205–215.
- Fernández, A. (2020). *Análisis preliminar de modelos de pirólisis de biomasa para generación de combustibles a partir de residuos*. Universidad de Sevilla.
- Fonts, I., Gea, G., Azuara, M., Ábrego, J., & Arauzo, J. (2012). Sewage sludge pyrolysis for liquid production : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2781–2805. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.070>
- Fonts, I., Kuoppala, E., & Oasmaa, A. (2009). *Physicochemical Properties of Product Liquid from Pyrolysis of*. 16, 4121–4128.
- Fytili, D., & Zabaniotou, A. Ñ. (2008). *Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods — A review*. 12, 116–140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.014>
- García-García, J. A., Reding-Bernal, A., & López-Alveranga, J. C. (2013). Calculo del tamaño de la muestra. *Elsiever*, 2(8), 217–224.
- García, J., Arenas, A., Cendales, L., & Baldovino, V. (2024). *Diseño y puesta en marcha de un sistema de pirólisis catalítica de poliestireno expandido*. 37(3), 57–71. <https://doi.org/10.18273/revion.v37n3-2024005>

- García, M. (2016). *Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de concentración de coliformes fecales y totales*. 128. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12044/1/UPS-CT005866.pdf>
- Ghodke, P. K., Sharma, A. K., Pandey, J. K., Chen, W. H., Patel, A., & Ashokkumar, V. (2021). Pyrolysis of sewage sludge for sustainable biofuels and value-added biochar production. *Journal of Environmental Management*, 298(August), 113450. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113450>
- Gómez, A., Klose, W., & Rincón, S. (2008). *Pirólisis de Biomasa: Cuesco de palma de aceite*.
- Guevara Alban, G. P., Verdesoto Arguello, A. E., & Castro Molina, N. E. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). *Recimundo*, 4(3), 163–173. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(3\).julio.2020.163-173](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(3).julio.2020.163-173)
- Hakeem, I. G., Halder, P., Dike, C. C., Chiang, K., Sharma, A., Paz-Ferreiro, J., & Shah, K. (2022). Advances in biosolids pyrolysis: Roles of pre-treatments, catalysts, and co-feeding on products distribution and high-value chemical production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 166(June), 105608. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105608>
- Hernández, R., Baptista, P., & Hernández, C. (2004). Metodología de la Investigación. *McGraw-Hill Interamericana*, 533. <https://dlwqtxts1xzle7.cloudfront.net/38911499/Sampieri.pdf?1443413542=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DSampieri.pdf&Expires=1592708228&Signature=ZdclgLZTpYIH4G1stS5H3kKoa3WxNM0XOMLNI2xJRxb5Wh9miJaH6NTCoRZpfx93hXCqVGqSGdKR1ROE5EEzbTU8XI>
- Hu, Y., & Chen, Z. (2025). Thermochemical Conversion of Sewage Sludge : Progress in Pyrolysis and Gasification. *Water*, 1–27.
- Inguanzo, M., Domínguez, A., Menéndez, J. A., Blanco, C. G., & Pis, J. J. (2002). On the pyrolysis of sewage sludge : the influence of pyrolysis conditions on solid , liquid and gas fractions. *Analytical and Applied Pyrolysis*, 63, 209–222.

- Inguanzo, M., Pis, J. J., & Menéndez, J. A. (2002). Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge. *Water Research*, 36, 3261–3264.
- Kumar, V., & Nanda, M. (2016). *Environmental Effects Biomass Pyrolysis-Current status and future directions*. 7036(October).
- LAASA LAB EIRL. (2025). *Determinaciones Recuento Total Microorganismos Aerobios viables Coliformes Totales Coliformes Termotolerantes E . coli Salmonella sp Hongos Huevos de Helminthos UNIDAD UFC / g NMP / g NMP / g NMP / g UFC / 25g UFC / g N ° Huevos x 40g Muestra Mo Determinac.* 1–3.
- Laboratorio de Hidrobiología, L. S. por E. S. (2025). *Informe de ensayo* (Vol. 30, Issue 56 2, pp. 1–20).
- Levano, G. M. C., Toledo, R. M., Cardich, R. V., Cadillo, E. A., & Torre, L. (2025). *Caracterización Fisicoquímica Y Microbiológica De Lodos De Ptar Y Bes Bajo Un Enfoque De Reaprovechamiento Agronómico Physicochemical And Microbiological Characterization Of Wwtp And Dt Sludge Under Agronomic Re-Use Approach*. 23(2).
- Mackey, H. R., & Al-ansari, T. (2022). *Pyrolysis of Biosolids to Produce Biochars : A Review*.
- Mahamud López, M., Gutiérrez Lavín, A., & Sastre Andrés, H. (1996). Biosólidos Generados En La Depuración De Aguas (I): Planteamiento Del Problema. *Ingeniería Del Agua*, 3(junio), 47–62.
- Manahan, S. (2007). *Subido a*. 789.
- Mancheno, M., Arévalo, P., Romero, J., Malo, I., & Ramos, R. (2017). *Introducción*. 26(2), 106–118.
- Martínez, J. M., & Lora, E. E. (2015). *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*.
- Martínez, M. (2012). *Estudio para el tratamiento, manejo y disposición final de lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable*. 79–81.
- Mcnamara, P. J., Koch, J., Zitomer, D., & Liu, Z. (2016). Pyrolysis of Dried Wastewater Biosolids Can Be Energy Positive Pyrolysis. *Water Environment Research*, 88(9), 804–810. <https://doi.org/10.2175/106143016X14609975747441>

- Mendoza G., L. E. (2016a). *Pirólisis de biosólidos en horno rotatorio*. 4–16.
- Mendoza G., L. E. (2016b). *Pirólisis de biosólidos en horno rotatorio*. Universidad Nacional de Colombia.
- Mendoza, L., Rincón, S., & Gómez, A. (2019). *Tratamiento térmico de biosólidos para aplicaciones energéticas*.
- Messaoudi, H., Koukouch, A., Bakhattar, I., Asbik, M., & Bonnamy, S. (2024). Physicochemical Characterization, Thermal Behavior, and Pyrolysis Kinetics of Sewage Sludge. *Energies Article*.
- Meza Mejía, J. E., Hernández Rivera, L. D., Arias Silva, D. A., & Albis Arrieta, A. R. (2025). Influencia de los parámetros operacionales en la pirólisis de biomasa con reactores Auger. *Investigación e Innovación En Ingenierías*, 13(1), 97–116. <https://doi.org/10.17081/invinno.13.1.7701>
- Montes Morán, M. Á., & Menéndez Díaz, J. Á. (2010). El problema de la gestión de lodos en EDARs. In *Nuevos materiales y tecnologías para el tratamiento del agua* (Issue January 2010, pp. 253–294). <https://digital.csic.es/handle/10261/95474>
- Montgomery, D. C. (2022). *Design and Analysis of Experiments* (Issue June).
- Naqvi, S. R., Tariq, R., Shahbaz, M., Naqvi, M., Aslam, M., Khan, Z., Mackey, H., Mckay, G., & Al-Ansari, T. (2021). Recent developments on sewage sludge pyrolysis and its kinetics: Resources recovery, thermogravimetric platforms, and innovative prospects. *Computers and Chemical Engineering*, 150, 107325. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107325>
- Obando, G. A. (2015). *Condiciones de diseño de un Reactor de Pirolisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos (ROS)*. Universidad de Manizales.
- Oladejo, J., Shi, K., Luo, X., Yang, G., & Wu, T. (2019). *A Review of Sludge-to-Energy Recovery Methods*. 1–38. <https://doi.org/10.3390/en12010060>
- Ordóñez, M. A. (2019). *Determinación del proceso óptimo de pirólisis de lodos residuales, para la mayor eficiencia de producto sólido*. Universidad Politécnica Salesiana.

- Oropeza García, N. (2006). Lodos residuales : estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, 1(figura 1), 51–58.
- Ortiz-hernández, M. L., & Gutiérrez-ruiz, M. E. S.-S. (1995). Propuesta De Manejo De Lodos Residuales De La Planta De Tratamiento De La Ciudad Industrial Del Valle De Cuernavaca, Estado De Morelso, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 1(2), 105–115.
- Pardo Martínez, F. (2024). *Estudio de la influencia de la temperatura en la pirólisis en reactor de lecho fluidizado de biosólidos generados en la PTAR El Salitre*. Universidad Nacional de Colombia.
- Pretell, V., Astorayme, M., Pilco, A., & Ramos, W. (2021). *Producción de Combustibles Líquidos por Pirólisis al Vacío de Neumáticos Usados*. 1–8.
- Punsuwan, N., & Tangsathitkulchai, C. (2014). *Product Characterization and Kinetics of Biomass Pyrolysis in a Three-Zone Free-Fall Reactor*. 2014.
- Ramón, J. A. (2005). Tratamiento de aguas residuales urbanas utilizando la depuración simbiótica. *Bistua: Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, 3(2), 26–33. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90330204>
- Ramos, W., Nahui-ortiz, J., Erazo, R., Manrique, H., Pretell, V., Ramos, W., Nahui-ortiz, J., Erazo, R., & Manrique, H. (2023). Modeling and Estimation of Physicochemical Properties of the Liquid Fuel Obtained from the Catalytic Pyrolysis of Disposable Masks Modelamiento y Estimación de Propiedades Fisicoquímicas del Combustible Líquido Obtenido de la Pirólisis Catalítica de Masca. *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 1–7.
- Ramos, W., Nahui-Ortiz, J., Erazo, R., & Pretell, V. (2023). Pirólisis catalítica de cubrebocas de polipropileno desechables para la obtención de combustibles líquidos. *Información Tecnológica*, 34(1), 1–10. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642023000100001>
- Rodríguez, L. (2019). *Producción de combustible por pirólisis de desechos plásticos*. Universidad Autonoma de Baja California.
- Saccani, C., Bonfiglioli, L., Bianchini, A., & Pellegrini, M. (2014). Sewage Sludge : Characteristics and recovery Options L . Bonfiglioli , A . Bianchini , M . Pellegrini

- , C. Saccani. *DIN, Facoltà Di Ingegneria, Università Di Bologna*, 2015, 1–21.
- Samolada, M. C., & Zabaniotou, A. A. (2014). Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration , gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. *Waste Management*, 34(2), 411–420. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.11.003>
- 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*, 36. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i10.7010>
- Skodras, G., Grammelis, P., Basinas, P., Kakaras, E., & Sakellariopoulos, G. (2006). Pyrolysis and combustion characteristics of biomass and waste-derived feedstock. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 45(11), 3791–3799. <https://doi.org/10.1021/ie060107g>
- Speight, J. G. (2006). *The chemistry and technology of petroleum* (CRC press.).
- Storm, C., Rudiger, H., Spliethoff, H., & Hein, K. R. G. (2016). Co-Pyrolysis of Coal/Biomass and Coal/Sewage Sludge Mixtures. *Engineering for Gas Turbines and Power*, 121(98).
- Syed-Hassan, S. S. A., Wang, Y., Hu, S., Su, S., & Xiang, J. (2017). Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel : Fundamentals , challenges and considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(January), 888–913. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.262>
- Torres, L., García, F., Asela, L., Lloréns, E., Carmen, M., & De, T. (2010). *Redalyc*.
- Torres, P., Pérez, A., Escobar, J. C., Uribe, I. E., & Imery, R. (2007). Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Engenharia Agrícola*, 27(1), 267–275. <https://doi.org/10.1590/s0100-69162007000100021>
- Urien Pinedo, A. (2013). *Máster Universitario en Ciencia y Tecnología Química Módulo : Química Analítica Biocombustibles mediante Pirolisis de Biomasa Residual” Andrea Urien Pinedo*.
- Valderrama, M. L. (2013). *Factibilidad de aprovechamiento de los lodos residuales de la PTAR del Municipio de Chinavita (Boyaca)*. 15.

- Valdés, O. ., & Palacios, O. M. (2016). Evolución Y Situación Actual De Plantaciones Para Biocombustibles: Perspectivas Y Retos Para México. *Agroproductividad*, 9, 33–41.
- Vargas, Y. (2017). *Calidad del Compost Producidos a Partir de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales en el Centro de Protección Ambiental “Santa Cruz”, Ciudad de Concepción*. Universidad Nacional del Centro del Perú Escuela.
- Wei, J., Zhang, J., Cai, B., Wang, K., Liang, S., & Geng, Y. (2021). Characteristics of carbon dioxide emissions in response to local development : Empirical explanation of Zipf ’ s law in Chinese cities. *Science of the Total Environment*, 757, 143912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143912>

APENDICE

Apéndice 1. Matriz de Consistencia

Tabla 32

Matriz de Consistencia para la Evaluación del rendimiento del proceso de pirólisis de Biosólidos generados en la Planta de Tratamientos de Aguas Residuales de San Jerónimo, Cusco

Evaluación del rendimiento del proceso de pirólisis de Biosólidos generados en la Planta de Tratamientos de Aguas Residuales de San Jerónimo, Cusco			
Problema	Objetivo	Variable	Metodología
General	General	Variables independientes	Tipo de investigación
¿Cuál es el rendimiento de los productos líquidos obtenidos a partir de la pirólisis de los biosólidos generados por la PTAR de San Jerónimo-Cusco?	Evaluar el rendimiento obtenidos a partir de la pirólisis de los biosólidos generados en la PTAR de San Jerónimo, Cusco.	✓ Temperatura (°C)	La investigación es de tipo experimental.
Específicos	Específicos	Variables dependientes	Enfoque de investigación
¿Cuáles son las características fisicoquímicas y biológicas de los biosólidos de la PTAR de San Jerónimo, Cusco?	Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los biosólidos de la PTAR de San Jerónimo, Cusco.	✓ Rendimiento del producto líquido	El enfoque de la investigación es cuantitativo.

¿Cuál es el efecto de la temperatura en el rendimiento de los productos líquidos obtenidos a través de la pirólisis de los biosólidos?

Evaluar el efecto de la temperatura en el rendimiento de los productos líquidos obtenidos a través de la pirólisis de los biosólidos.

¿Cuáles son las características fisicoquímicas del producto líquido obtenido en condiciones de mayor rendimiento a partir de la pirólisis de los biosólidos generados?

Determinar las características fisicoquímicas de los productos líquidos obtenidos bajo las condiciones que resultaron en un mayor rendimiento en la pirólisis de los biosólidos generados

Variable Interviniente

- ✓ Temperatura Ambiente (°C)
- ✓ Presión Atmosférica (atm)

Alcance de investigación

El alcance o nivel de investigación es descriptiva y explicativa.

Apéndice 2. Lectura de los sensores de temperatura del reactor

En la tabla 33 se muestran los datos de temperaturas referentes al reactor con las respectivas temperaturas programadas en el horno (700, 750, 800 y 850 °C). Se puede observar que la variación entre horno y reactor es de 150°C aprox.

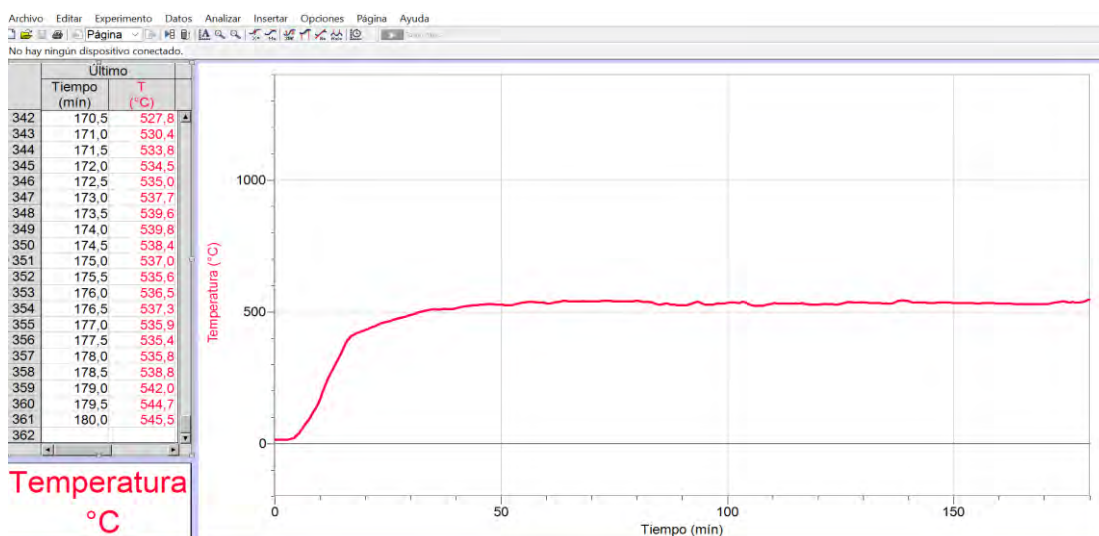
Tabla 33

Datos obtenidos mediante el Software “Logger pro” con respecto al reactor

Tiempo (min)	Temperatura (°C)			
	700	750	800	850
0	14.32	16.50	16.72	77.34
10	173.10	177.57	206.00	531.04
20	432.67	477.76	559.67	648.45
30	490.01	544.01	588.65	665.45
40	513.73	550.00	598.70	667.92
50	527.18	548.46	606.52	682.00
60	533.75	565.44	606.11	683.79
70	539.93	560.70	605.87	684.22
80	541.24	566.74	599.66	683.47
90	525.25	567.32	601.84	686.59
100	534.02	569.52	602.54	687.80
110	533.00	572.06	604.61	687.05
120	527.06	571.65	604.71	688.18
130	535.75	572.61	606.16	695.35
140	540.49	573.51	606.88	696.49
150	532.95	573.87	606.91	699.51
160	530.42	574.25	607.71	697.70
170	527.74	574.35	607.90	699.32
180	545.51	574.40	608.26	697.55

Figura 31

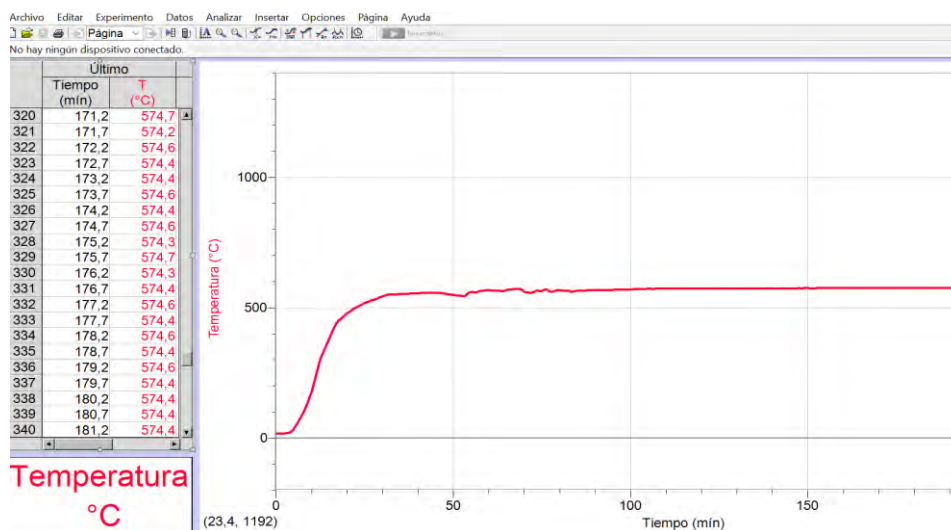
Gráfica de la corrida experimental a 700 °



Nota. Se tomó los datos referentes al reactor, ya que la variación entre horno y reactor es de 150°C aprox- Software “Logger pro”. Lectura de los sensores de temperatura del horno a condiciones de 700 °C

Figura 32

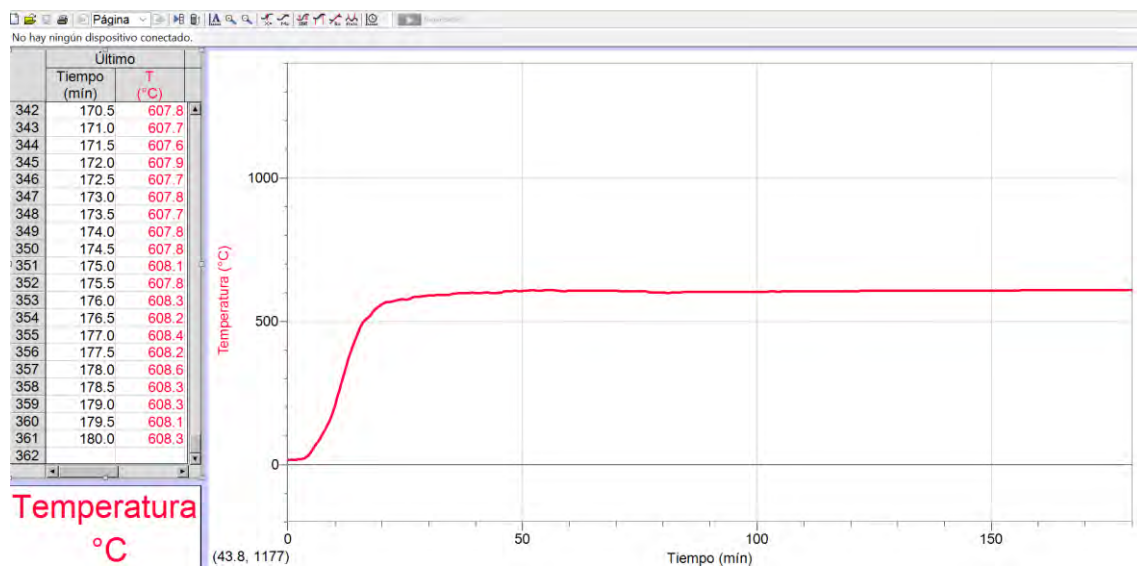
Gráfica de la corrida experimental a 750 °C



Nota. Se tomó los datos referentes al reactor, ya que la variación entre horno y reactor es de 150°C aprox- Software “Logger pro”. Lectura de los sensores de temperatura del horno a condiciones de temperatura 750 °C

Figura 33

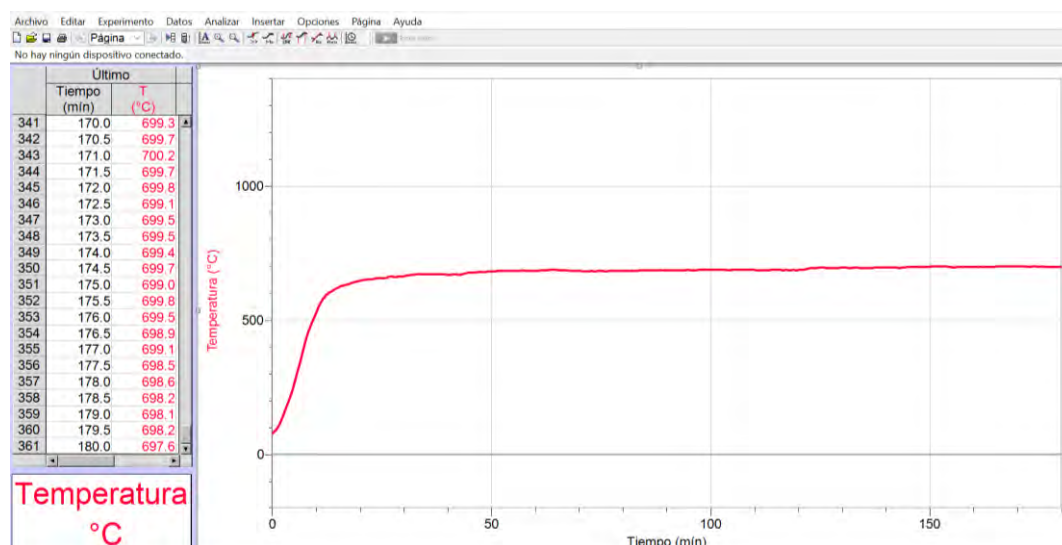
Gráfica de la corrida experimental a 800 °C



Nota. Se tomó los datos referentes al reactor, ya que la variación entre horno y reactor es de 150°C aprox- Software "Logger pro". Lectura de los sensores de temperatura del horno a condiciones de temperatura 800 °C.

Figura 34

Gráfica de la corrida a 850 °C



Nota. Se tomó los datos referentes al reactor, ya que la variación entre horno y reactor es de 150°C aprox- Software "Logger pro". Lectura de los sensores de temperatura del horno a condiciones de temperatura 850 °C.

Apéndice 4. Resultados de las corridas de DWSIM

- CORRIDA SOFTWARE DWSIM: 750 °C

Figura 35

Caracterización de líquido pirolítico con curva ASTM D86 Software “DWSIM”

DWSIM - Petroleum Characterization

Experimental Data Paste from Clipboard

% VAP	Temperature (C)
0	77
5	88
10	94
15	96
20	97
25	98
30	99
40	100
50	101
60	165
70	205
80	210
93	220

Step 2 - Experimental Data
Enter experimental data as a function of vaporized liquid percentage. At least six points are required for each curve.

Click 'Next' to continue.

Save Assay Data Cancelar < Previous Siguiente >

Figura 36

Elección de 30 pseudocomponentes para líquido de pirolisis - Software “DWSIM”

DWSIM - Petroleum Characterization

Pseudocomponent Creation Method

☒ Number of pseudocomponents 30

☐ Define cut temperatures

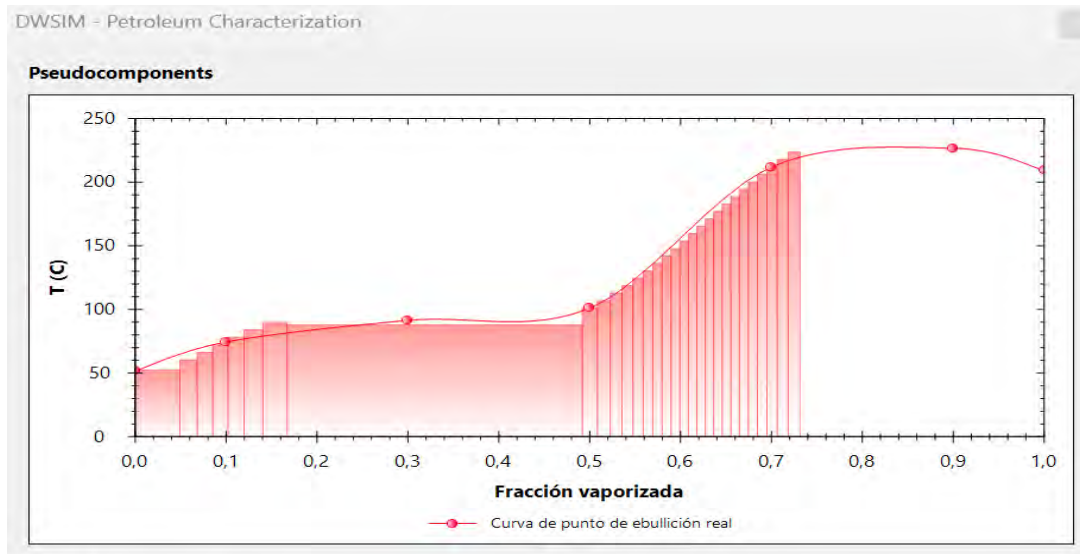
Step 4 - Configure Pseudocomponents
Select the method for generation of pseudocomponents. If you select the second option, the values must be in the current temperature unit, with a value per line only (use the ENTER key to position the cursor in the next line). DO NOT INCLUDE the maximum and minimum temperatures of the curve in the list!

Click 'Next' to continue.

Cancelar < Previous Siguiente >

Figura 37

Pseudocomponentes para el líquido de pirolisis -Software “DWSIM”



Step 5 - View Cuts

The graph above shows the cuts (pseudocomponents). If everything is correct, click 'Next' to select the methods/correlations to calculate some of the components' properties.

Click 'Next' to continue.

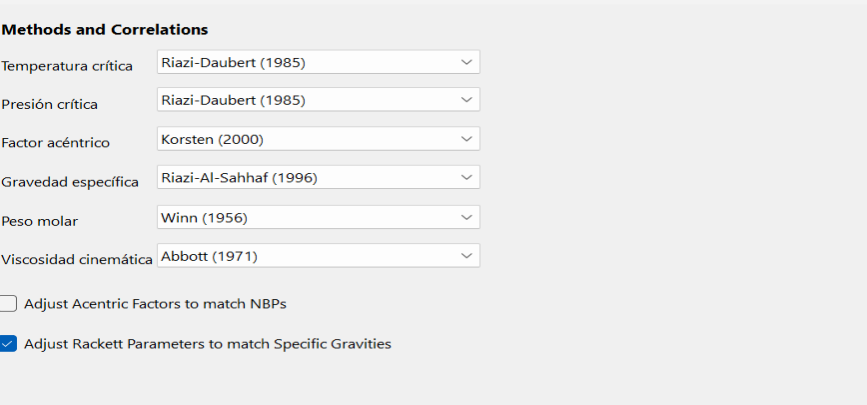
Cancelar

< Previous

Siguiente >

Figura 38

Elección de métodos y correlaciones para la caracterización por curva ASTM D86 de líquido de pirolisis -Software “DWSIM”



Step 6 - Methods and Correlations

Select the methods and correlations to calculate the pseudocomponents' properties.

Click 'Next' to continue.

Cancelar

< Previous

Siguiente >

Figura 39

Resultados de la caracterización con 30 pseudocomponentes para liquido de pirolisis
Software “DWSIM”

DWSIM - Petroleum Characterization

Resultados

Nombre	Fracción molar	NBP (C)	SG	MW (kg/kmol)	Tc (C)	Pc (bar)	Ac. Factor
C_7289_NBP_52	0,083966	52,2996	0,958032	77,1118	270,286	61,678	0,111021
C_7289_NBP_60	0,0309296	60,396	0,968622	80,9133	281,17	60,3476	0,119264
C_7289_NBP_66	0,0272143	66,3162	0,976136	83,761	289,084	59,4042	0,125274
C_7289_NBP_72	0,0263121	72,1952	0,983414	86,646	296,905	58,4918	0,131227
C_7289_NBP_78	0,0271806	78,0698	0,990512	89,5857	304,687	57,604	0,13716
C_7289_NBP_84	0,0302655	83,9625	0,997464	92,5919	312,459	56,7373	0,143095
C_7289_NBP_90	0,0386417	89,9377	1,00435	95,6992	320,307	55,8823	0,149096
C_7289_NBP_88	0,472641	87,7967	1,0019	94,579	317,498	56,1859	0,146947
C_7289_NBP_101	0,0225224	101,195	1,01689	101,715	335,008	54,3354	0,160354
C_7289_NBP_107	0,0191341	107,056	1,02321	104,932	342,619	53,5622	0,16619
C_7289_NBP_112	0,0169521	112,004	1,02028	108,108	350,187	52,9118	0,171006

You can edit/update the values on the above table before creating the oil stream.

Step 7 - Results
The table above shows the characterization results. Click 'Finalize' to exit and add a Material Stream to the simulation with the created pseudocomponents.

Stream name:

Figura 40

Resultado del valor estimado por el software a 15.566 °C o 60°F de la densidad para comparación con reales de laboratorio- Software “DWSIM”

L_7289 (Material Stream)

Propiedad	Valor	Unidades
Caudal másico	0	kg/h
Caudal molar	0	kmol/h
Caudal volumétrico @ T, P	0	m3/h
Conductividad térmica	0,127135	W/[m.K]
Densidad	1002,88	kg/m3
Energía interna	-332,426	kJ/kg
Energía interna molar	-34054,8	kJ/kmol
Energía libre de Gibbs	-119,719	kJ/kg
Entalpía específica	-331,926	kJ/kg
Entalpía molar	-34003,6	kJ/kmol
Entropía específica	-0,711747	kJ/[kg.K]
Entropía molar	-72,9135	kJ/[kmol.K]
Helmholtz Energía Libre	-120,219	kJ/kg
Molar Gibbs Energía Libre	-12264,4	kJ/kmol
Molar Helmholtz Energía Libre	-12315,6	kJ/kmol
Peso molecular	102,443	kg/kmol

ANEXOS

Anexo 1. Análisis microbiológico de lodos residuales de una PTAR

El Anexo 1 presenta el ejemplo de resultado de lodos residuales que contienen una alta concentración de coliformes fecales y totales, lo que resalta la necesidad de un tratamiento adicional antes de su posible reutilización.

En la Tabla 34, se detalla el análisis microbiológico de los lodos residuales generados en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas. Este análisis incluye los resultados de indicadores microbiológicos clave, como coliformes fecales y totales, así como huevos de helmintos, lo cual es esencial para evaluar la calidad y posibles aplicaciones de los lodos.

Tabla 34

Análisis Microbiológico de los Lodos Residuales de una PTAR

ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Coliformes fecales	NMP/g	NA	0.18	17000000.00
Coliformes totales	NMP/g	NA	0.18	92000000.00
Huevos de helmintos	Huevos/2gST	NA	1.0	1.0
Salmonella sp	NMP/gST	NA	3.0	<3.0
Forma de partícula	NINGUNA	NA	NA	1
Conductividad eléctrica	uS/cm	NA	0.01	2147.00
Ceniza total	%	0.10	0.30	1.83

Densidad aparente	g/ml	0.03	0.10	0.35
Humedad	%	0.0500	0.1000	74.2825
Sólidos volátiles	%	0.030	0.025	21.543
Carbón total	%	0.100	0.300	50.589
Nitrógeno amoniacal	mg/kg	0.03	0.10	126.00
Nitrógeno total	mg/kg	50.00	150.00	29326.00
Azufre total	%	0.0100	0.0300	0.3613
Metales totales en suelos				
Aluminio	mg/kg	0.10	0.30	154.20
Antimonio	mg/kg	0.06	0.20	1.89
Arsénico	mg/kg	0.02	0.10	<0.10
Bario	mg/kg	0.01	0.03	17.96
Berilio	mg/kg	0.01	0.03	<0.03
Bismuto	mg/kg	0.06	0.20	1.57
Boro	mg/kg	0.03	0.10	9.93
Cadmio	mg/kg	0.005	0.020	0.890
Calcio	mg/kg	0.01	0.4	17128.2

Cerio	mg/kg	0.04	0.10	<0.10
Cobalto	mg/kg	0.05	0.20	0.40
Cobre	mg/kg	0.005	0.020	23.080
Cromo	mg/kg	0.01	0.03	26.40
Estaño	mg/kg	0.03	0.10	<0.10
Estroncio	mg/kg	0.05	0.20	93.71
Fosforo	mg/kg	0.04	0.10	2743.00
Hierro	mg/kg	0.06	0.20	170.65
Litio	mg/kg	0.003	0.010	1.700
Magnesio	mg/kg	0.06	0.20	1268.43
Manganeso	mg/kg	0.01	0.03	41.63
Mercurio	mg/kg	0.01	0.04	<0.04
Molibdeno	mg/kg	0.03	0.10	2.19
Níquel	mg/kg	0.01	0.04	3.76
Plata	mg/kg	0.03	0.10	1.40
Plomo	mg/kg	0.05	0.20	3.73
Potasio	mg/kg	0.30	1.00	1267.71
Selenio	mg/kg	0.05	0.20	<0.20

Silicio	mg/kg	0.02	0.07	6.11
Sodio	mg/kg	0.03	0.10	837.55
Talio	mg/kg	0.01	0.04	0.25
Titanio	mg/kg	0.03	0.10	<0.10
Torio	mg/kg	0.01	0.03	<0.03
Uranio	mg/kg	0.01	0.03	6.60
Vanadio	mg/kg	0.01	0.04	1.47
Zinc	mg/kg	0.01	0.02	120.17

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el

L.C.M. L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

Nota. Adaptado de (TECNICAS DE DESALINIZACION DE AGUAS S.A.)

Anexo 2. Análisis microbiológico de biosólidos de la PTAR de San Jerónimo-Cusco.

El Anexo 2 presenta los resultados de biosólidos que contienen una concentración de huevos de helmintos, metales y salmonella sp, lo que resalta la necesidad de un tratamiento adicional antes de su posible reutilización.

	LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LE 003	 Registro N° LE - 003
INFORME DE ENSAYO N° 1-06700/25		
Pág. 1/4		
DATOS DEL CLIENTE ^(*)		
Cliente	EPS. SEDACUSCO S.A.	
Domicilio legal	Av. Anselmo Álvarez Nro. 364 - Wanchaq - Cusco - Cusco	
DATOS DE LA MUESTRA		
Producto declarado ^(*)	LODOS	
Procedencia de la muestra	Proporcionada por el solicitante y/o cliente	
Cantidad de muestra para el ensayo	1 muestra x 2 kg	
Presentación y condición de recepción	Pote	
Identificación y descripción ^(*)	Nombre del proyecto: Centrifuga de BIOSÓLIDOS Lugar de muestreo: PTAR San Jerónimo S/N Punto de muestreo: SALA CENTRIFUGA Fecha de muestreo: 26/03/2025 Hora de muestreo: 09:30	
Fecha de recepción	2025 - 03 - 28	
Fecha de inicio del ensayo	2025 - 04 - 02	
Fecha de término del ensayo	2025 - 04 - 09	
Ensayo realizado en	Laboratorio Hidrobiología / Metales / Agrícola / Ambiental / Laboratorio Subcontratado	
Identificado con	EXMA-02810-2025 OSMA-02810-2025-001	
Validez del documento	Este documento es válido solo para las muestras descritas.	

(*) Datos proporcionados por el solicitante y/o cliente. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el solicitante y/o cliente pueda afectar la validez de los resultados.



AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores - Arequipa
T. (054) 265572

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao
T. (511) 319 9000

info@cerper.com - www.cerper.com

INFORME DE ENSAYO N° 1-06700/25

Pág. 214

Análisis Hidrobiológico:

(*) Huevos de Helmintos:

Grupo	Clase	Taxón	Resultados (Huevos/L)
H E L M I N T O S	Trematoda	<i>Fasciola hepatica</i>	<1
		<i>Paragonimus sp.</i>	<1
		<i>Schistosoma sp.</i>	<1
		<i>Clonorchis sp.</i>	<1
		<i>Echinostoma sp.</i>	<1
	Cestoda	<i>Taenia sp.</i>	<1
		<i>Dipylidium sp.</i>	<1
		<i>Hymenolepis sp.</i>	<1
		<i>Diphyllobothrium sp.</i>	<1
		<i>Ascaris sp.</i>	<1
	Nematoda	<i>Ancylostoma sp. / Necator sp.</i>	<1
		<i>Trichostrongylus sp.</i>	<1
		<i>Capillaria sp.</i>	<1
		<i>Strongyloides sp.</i>	<1
		<i>Enterobius sp.</i>	<1
	Acanthocephala	<i>Macracanthorhynchus sp.</i>	<1

Nota: <1 es equivalente a la no detección de huevos de helmintos

(*) "Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA."

Análisis Físico Químico:

Ensayos	LDM	Unidad	Resultados
(*) Humedad	-	g/100 g	71
(*) Nitrógeno Total	0,014	g/100 g	2,92
pH	-	Unidades de pH	8,00
(*) Sólidos Totales	2,5	% (g/100g)	28,42
(*) Sólidos Volátiles	2,5	% (g/100g)	12,51

LDM: Límite de detección del método

(*) "Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA."



AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores - Arequipa
T. (054) 265572

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao
T. (511) 319 9000

info@cerper.com - www.cerper.com

INFORME DE ENSAYO N° 1-06700/25

Pág. 3/4

Análisis Metales:

Ensayo	LDM	Unidad	Resultados
Aluminio (Al)	0,05	mg/kg	10 432
Antimonio (Sb)	0,02	mg/kg	0,509
Arsénico (As)	0,05	mg/kg	7,45
Bario (Ba)	0,015	mg/kg	230
Berilio (Be)	0,015	mg/kg	<0,015
Bismuto (Bi)	0,05	mg/kg	25,25
Boro (B)	1	mg/kg	8,2
Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	1,179
Calcio (Ca)	5	mg/kg	44 842
Colbalto (Co)	0,03	mg/kg	5,02
Cobre (Cu)	0,03	mg/kg	126,7
Cromo (Cr)	0,05	mg/kg	46,0
Estaño (Sn)	0,025	mg/kg	4,30
Estroncio (Sr)	0,045	mg/kg	224,0
Fósforo (P)	1	mg/kg	10 457
Hierro (Fe)	1	mg/kg	12 575
Litio (Li)	0,025	mg/kg	17,2
Metales por ICP-MS			
Magnesio (Mg)	1	mg/kg	7 417
Manganeso (Mn)	0,025	mg/kg	249
Mercurio (Hg)	0,01	mg/kg	0,399
Molibdeno (Mo)	0,02	mg/kg	2,977
Níquel (Ni)	0,035	mg/kg	12,91
Plata (Ag)	0,005	mg/kg	3,22
Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	32,7
Potasio (K)	1	mg/kg	1 599
Selenio (Se)	0,05	mg/kg	3,64
Silicio (Si)	1	mg/kg	<1
Sodio (Na)	1	mg/kg	605
Talio (Tl)	0,025	mg/kg	0,1940
Teluro (Te)	0,05	mg/kg	<0,05
Titanio (Ti)	0,05	mg/kg	80,7
Uranio (U)	0,005	mg/kg	<0,005
Vanadio (V)	0,05	mg/kg	25,2
Wolframio (W)	0,05	mg/kg	<0,05
Zinc (Zn)	0,05	mg/kg	1 047

LDM: Límite de detección del método



AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores - Arequipa
T. (054) 265572

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao
T. (511) 319 9000

info@cerper.com - www.cerper.com

EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE.

INFORME DE ENSAYO N° 1-06700/25

Pág. 4/4

Análisis Subcontratado:

Ensayo	LDM	Unidad	Resultado
(1) <i>Salmonella</i> sp.	1,8	NMP/10g ST	<1,8

LDM: Límite de detección del método

(1) Ensayo Subcontratado No Acreditado

MÉTODOS

Metales por ICP-MS: EPA Method 6020B. 2014. Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. (Preparación de muestra: EPA Method 3051A. 2007. Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils).

Metales por ICP-MS (Li, B, P, Ti, Sr, Mo, Sn, W, Bi y U): EPA Method 6020B (Preparación de muestra: EPA Method 3050B, 1996). Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (Acid Digestion Of Sediments, Sludges And Soils).

(*) **Detección y/o enumeración de Huevos de Helmintos:** OMS. Análisis de aguas residuales para su uso en agricultura. Manual de técnicas parasitológicas y bacteriológicas de laboratorio. 2, 2.1 1997. Método de Baillenger modificado.

(*) **Humedad:** DINAMA Versión 1. 2017. 1050UY Determinación de humedad en muestras sólidas (residuos sólidos industriales, sedimentos, suelos). Método termogravimétrico.

(*) **Nitrógeno Total:** NOM-021-SEMARNAT-2000-2002-(Segunda edición). Que establece las especificaciones de salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. AS-25. Nitrógeno Total 7.3.17.

(1) ***Salmonella* sp.:** NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SEMA-RNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final

(*) **Sólidos Totales:** SMEWW-APHA AWWA-WEF.PART 2540 G, 24th. Ed. 2023. Total, Fixed, and Volatile Solids in Solid and Semisolid Samples

(*) **Sólidos Volátiles:** SMEWW-APHA AWWA-WEF.PART 2540 G, 24th. Ed. 2023. Total, Fixed, and Volatile Solids in Solid and Semisolid Samples

pH: Gobierno de Chile. Protocolo de Métodos de Análisis para Suelos y Lodos. Universidad de Concepción. Elaborado con la participación de la Comisión de Normalización y Acreditación de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo por encargo del Servicio Agrícola y Ganadero. 2007. Método 4.1 (VALIDADO). pH.Suspensión y determinación potenciométrica (lodos y suelos).

(*) "Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA."

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

Callao, 25 de abril de 2025

BC

CERTIFICACIONES DEL PERU S.A.**ING. SONIA GARCÍA CANALES**

C.I.P. N° 33422

COORDINADORA DEL ÁREA DE EMISIÓN DE INFORMES

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

AREQUIPA

Calle Teniente Rodríguez N° 1415

Miraflores - Arequipa

T. (054) 265572

CALLAO

Oficina Principal

Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao

T. (511) 319 9000

info@cerper.com - www.cerper.com

EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE

Anexo 3. Análisis microbiológico de biosólidos de la PTAR de San Jerónimo-Cusco después del pre tratamiento.

El Anexo 3 presenta los resultados de los biosólidos después del pretratamiento que consistió en secar la muestra para eliminar la alta concentración de humedad y patógenos.



LAASA LAB
Servicios de análisis de aguas, alimentos y residuos ambientales
RUC: 20607268526

INFORME N° 07 LAASA LAB EIRL. 2025
ANALISIS MICROBIOLOGICO DE BIOSÓLIDOS
SOLICITANTES : Liz Marina Zamalloa Delgado, Cod: 164321
Shiomara Kimberly Gutierrez Surco, Cod:151867
PROYECTO TESIS: "EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO Y CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS PRODUCTOS LIQUIDOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA PIRÓLISIS DE LOS BIOSÓLIDOS GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES DE SAN JERÓNIMO, CUSCO"
UNIVERSIDAD SAAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO – FACULTAD DE INGENIERIA DE PROCESOS – ESCUELA PROFESIONAL INGENIERIA PETROQUÍMICA

➤ MUESTRA: BIOSÓLIDOS PTAR – SAN JERÓNIMO, CUSCO

➤ CARACTERIZACION DE LA FUENTE DE LAS MUESTRAS

Lugar de Procedencia : PTAR San Jerónimo
Distrito : San Jerónimo – Cusco
Fecha de muestreo : 27/02/2025
Recibida : En Bolsa Ziploc.

RESULTADOS

DETERMINACIONES	UNIDAD	Muestra M0
Recuento Total Microorganismos Aerobios viables	UFC/g	1 345
Coliformes Totales	NMP/g	240
Coliformes Termotolerantes	NMP/g	0
E. coli	NMP/g	0
Salmonella sp	UFC/25g	0
Hongos	UFC/g	169
Huevos de Helmintos	N° Huevos x 40g	0

Cusco, 05 de marzo del 2025.
MCYM.
NOTA: Los resultados son válidos únicamente para la muestra analizada.

**LAASA LAB**

Laboratorio de análisis de aguas, alimentos y productos agropecuarios

RUC: 20607268526

INFORME N° 07 LAASA LAB EIRL. 2025**ANALISIS MICROBIOLOGICO DE BIOSÓLIDOS**

SOLICITANTES : Liz Marina Zamalloa Delgado, Cod: 164321
Shiomara Kimberly Gutierrez Surco, Cod:151867

PROYECTO TESIS: "EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO Y CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS PRODUCTOS LIQUIDOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA PIRÓLISIS DE LOS BIOSÓLIDOS GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES DE SAN JERÓNIMO, CUSCO"
UNIVERSIDAD SAAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO – FACULTAD DE INGENIERIA DE PROCESOS – ESCUELA PROFESIONAL INGENIERIA PETROQUÍMICA

➤ **MUESTRA: BIOSÓLIDOS PTAR – SAN JERÓNIMO, CUSCO**

➤ **CARACTERIZACION DE LA FUENTE DE LAS MUESTRAS**

Lugar de Procedencia : PTAR San Jerónimo
Distrito : San Jerónimo – Cusco
Fecha de muestreo : 27/02/2025
Recibida : En Bolsa Ziploc.

RESULTADOS

DETERMINACIONES	UNIDAD	Muestra M 10 ⁻⁴
Recuento Total Microorganismos	UFC/g	145
Aerobios viables		
Coliformes Totales	NMP/g	43
Coliformes Termotolerantes	NMP/g	0
E. coli	NMP/g	0
Salmonella sp	UFC/25g	0
Hongos	UFC/g	58
Huevos de Helmintos	N° Huevos x 40g	0

Cusco, 05 de marzo del 2025.

MCYM.

NOTA: Los resultados son válidos únicamente para la muestra analizada.


Biolga. María de Carmen Yáñez Mujica
BIOLOGA
C.B.P. 8298



LAASA LAB

Servicios de análisis de aguas, alimentos y residuos ambientales

RUC: 20607268526

1. REGISTRO FOTOGRAFICO

Anexo 4. Informe de ensayo del análisis del producto liquido de la pirolisis de biosólidos

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica Centro de Certificación, Inspección y Ensayos de Productos Petroleros, Gas Natural y Derivados - CERTIPETRO			
INFORME DE ENSAYOS N° IE - 106025			
IE N° 106025 /Página 1 de 1			
1. INFORMACIÓN GENERAL			
1.1	Solicitante (Nombre Legal)	LIZ MARINA ZAMALLOA DELGADO	
1.2	Dirección Legal	-	
1.3	Provincia / Departamento	-	
1.4	Teléfono:	970576396	
1.5	RUC (N°)	-	
1.6	Solicitud para Servicios de Ensayos (N°)	SS-60-25	
1.7	Fecha de Recepción de Solicitud	23/12/2025	
1.8	Ensayos / Servicios Solicitados	1 Ensayo Fisicoquímico	
1.9	Fecha de Inicio de Ensayo	30/12/2025	
1.10	Fecha de Término de Ensayo	31/12/2025	
2. INFORMACIÓN DEL PRODUCTO			
2.1	Producto (Nombre Genérico)	Líquido pirólitico de Biosólidos	
2.2	Identificación de las Muestras Recepcionadas	Líquido pirólitico de Biosólidos	
2.3	Marca Comercial o Especial de las Muestras	-	
2.4	Número de Muestras Recepcionadas	1	
2.5	Cantidad de Muestra Recepcionada	100 ml	
2.6	Forma de Presentación de las Muestras	Botella de vidrio	
3. RESULTADOS			
Item	ENSAYOS	MÉTODO DE ENSAYO APLICADO	RESULTADOS OBTENIDOS
3.2	Destilación a 760 mmHg	ASTM D86	
	Punto Inicial (°C)		77.0
	5% Recuperado (°C)		88.0
	10% Recuperado (°C)		94.0
	15% Recuperado (°C)		96.0
	20% Recuperado (°C)		97.0
	25% Recuperado (°C)		98.0
	30% Recuperado (°C)		99.0
	40% Recuperado (°C)		100.0
	50% Recuperado (°C)		101.0
	60% Recuperado (°C)		165.0
	70% Recuperado (°C)		205.0
	80% Recuperado (°C)		210.0
	85% Recuperado (°C)		-
	90% Recuperado (°C)		-
	95% Recuperado (°C)		-
	Punto Final (°C)		220.0
	Recuperado (%Vol)		83.0
	Residuo (%Vol)		16.0
	Perdida (%Vol)		1.0
4. OBSERVACIONES			

Especificaciones sobre el uso del Informe de Ensayos:

- El presente informe de ensayos se refiere únicamente a la muestra analizada.
- Cualquier corrección o enmienda en el contenido del presente documento, lo anula automáticamente.
- Las enmiendas al presente documento no efectuadas por CERTIPETRO, constituyen un delito contra la fe pública y el infractor es sujeto de sanciones civiles y penales reguladas por dispositivos legales vigentes.
- Está prohibida la reproducción parcial del presente informe de ensayo. El uso de la reproducción parcial también constituye un delito contra la fe pública.
- El presente informe de ensayos es válido por noventa (90) días calendario, contados a partir de la fecha de su emisión.
- El presente informe de ensayos, el logotipo y nombre de CERTIPETRO no pueden ser utilizados para fines publicitarios. Salvo previa autorización escrita del Director Ejecutivo de CERTIPETRO o del Decano de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica-UNI.

Rimac, 31 de diciembre de 2025

MSc. Ing. WILLIAMS JAVIER RAMOS VASQUEZ
 Director Técnico
 Reg. CIP: 226122

Formato DTL-005.03

Anexo 5. Tamizaje de la muestra seca de biosólidos



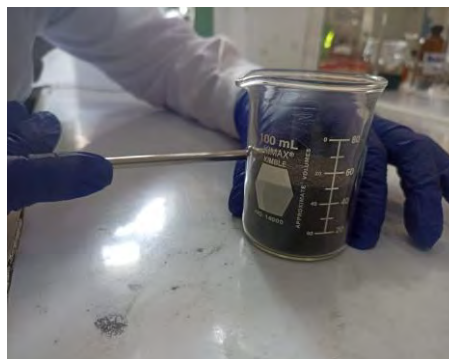
Anexo 6. Recolección de la muestra seca de biosólidos



Anexo 7. Determinación del poder calorífico



Anexo 8. Determinación de la densidad aparente



Anexo 9. Introducción del reactor al horno



Anexo 10. Sistema de enfriamiento



Anexo 11. Conexión del sistema de enfriamiento con el sistema de vacío



Anexo 12. Sistema experimental para la pirólisis de biosólidos

