

**UNIVERSIDAD THOMAS MORE
Managua, Nicaragua**

**Estudio de viabilidad para la cogeneración de energía a partir de biosólidos del sistema
de biodigestores de San Martín**

**Red BIFUTURO: Productos de valor agregado desde residuos: (Bio) tecnología para un
futuro sostenible (BIOFUTURO)**

Pedro Villarreal, Silvia Aguilera, Michael Barrantes

21 de noviembre de 2025

Contenido

Resumen	4
I. Introducción	6
1.1 Antecedentes y contexto.....	6
II. Objetivos.....	8
2.1 Objetivo General	8
2.2 Objetivos Específicos.....	8
III. Preguntas de investigación	10
3.1 Pregunta general de investigación	10
3.2 Producción y disponibilidad.....	10
3.3 Caracterización energética.....	10
3.4 Acondicionamiento del biosólido.....	10
3.5 Evaluación técnica en caldera	11
3.6 Análisis económico	11
3.7 Aplicación al modelo de economía circular.....	11
IV. Justificación.....	12
V. Limitaciones	14
VI. Variables	16
Metodología.....	16
6.1 Variable dependiente.....	16
6.2 Variables independientes.....	17
6.3 Variables de control:.....	17
VII. Categorías, temas y patrones de emergencia de la investigación.	18
VIII. Supuestos básicos	19
IX. Contexto de la investigación	20
X. Marco Teórico	21
10.1 Estado del arte.....	24
10.2 Perspectiva teórica asumida.....	25
XI. Métodos	27
11.1 Tipo de diseño	27
11.2 Perspectiva cuantitativa.....	27
11.2.1 Tipo de investigación.....	27

11.2.2 Población y muestra.....	27
11.2.3 Variables.....	28
11.2.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	28
11.2.5 Confiabilidad y validez de los instrumentos.	29
11.2.6 Procesamiento de datos y análisis de la información	29
11.3 Perspectiva cualitativa.....	30
11.3.1. Enfoque cualitativo asumido y su justificación.....	30
11.3.2 Muestra teórica y sujetos del estudio	30
11.3.3 Métodos y técnicas de recolección de datos	31
11.3.4 Métodos y técnicas para el procesamiento de datos y análisis de información	31
11.3.5 Criterios de calidad, credibilidad, confiabilidad, confirmabilidad, transferibilidad y triangulación.....	32
XII. Resultados o hallazgos.....	34
12.1 Producción de biosólidos en el biodigestor	34
12.2 Caracterización energética del biosólido.....	36
12.3 Condiciones previas: Proceso de secado del biosólido	41
12.4 Pruebas experimentales en caldera industrial	45
12.5 Análisis técnico de resultados.....	46
12.6 Análisis económico del proyecto.....	48
12.7 Estimación de inversión	49
XIII. Discusiones.....	52
13.1 Conclusiones	53
13.2 Recomendaciones	55
Referencias	56
Anexos	58
1. Preparación del área de secado	59
2. Caracterización inicial del biosólido.....	59
3. Procedimiento de secado y muestreo.....	59
4. Registro de datos	60
5. Condiciones críticas a observar.....	60
Anexo 10.5 Galería de fotografías.....	65
Anexo 10.6 Minutas de cantidad de biosólido para la prueba de secado en patio	68

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo principal determinar la factibilidad técnica del uso de biosólidos generados en el biodigestor de Industrial Comercial San Martín como combustible para la generación de vapor en caldera de biomasa. La iniciativa se enmarca en el interés de la empresa en fortalecer su modelo de economía circular y proveer soluciones energéticas sostenibles mediante el aprovechamiento de residuos orgánicos generados en su actividad operativa.

Este trabajo se desarrolló en varias etapas. En primer lugar, se realizó el monitoreo y cuantificación de los biosólidos generados, estableciendo su disponibilidad como insumo energético. Posteriormente, se caracterizó el poder calorífico del biosólido en diferentes niveles de humedad, identificando la influencia de la humedad en la eficiencia energética del material. Con base en estos resultados, se acondicionó el biosólido mediante secado natural hasta alcanzar un contenido de humedad aproximado del 20%, considerado óptimo para su utilización en caldera. Finalmente, se llevaron a cabo pruebas experimentales en una caldera industrial en la Empresa E-Chamorro, evaluando parámetros como la estabilidad de la combustión, la generación de vapor y la eficiencia en la transferencia de energía.

Los resultados obtenidos indican que el biosólido acondicionado posee un poder calorífico adecuado para la generación de vapor, y que su combustión es estable y eficiente en condiciones controladas. Esto confirma que el biosólido producido en Industrial Comercial San Martín es técnicamente factible como combustible en calderas de biomasa, aportando una alternativa energética sostenible y alineada con los principios de economía circular.

El estudio proporciona una base técnica sólida para la potencial implementación de sistemas de cogeneración de energía a partir de biosólidos en la empresa, al tiempo que establece recomendaciones para optimizar el acondicionamiento del material y maximizar su eficiencia energética.

I. Introducción

1.1 Antecedentes y contexto.

La valorización energética de biosólidos ha recibido creciente atención en la literatura científica como una alternativa sostenible para la gestión de residuos orgánicos y la reducción de la dependencia de combustibles fósiles. Investigaciones previas señalan que los biosólidos derivados de la digestión anaerobia poseen un potencial energético significativo que depende principalmente de su contenido de humedad y composición mineral (Zhang et al., 2020; Li et al., 2019). La EPA (1999) y estudios como los de González-García et al. (2018) han destacado que estos materiales requieren procesos de acondicionamiento, especialmente el secado, para alcanzar un poder calorífico adecuado para su combustión. Asimismo, Appels et al. (2008) y Mata-Alvarez et al. (2014) explican que la digestión anaerobia genera un residuo estabilizado, pero con alta humedad, lo cual limita su uso directo como combustible. Investigaciones específicas en combustión de biomasa muestran que la humedad y el contenido de cenizas influyen directamente en la eficiencia térmica y la estabilidad operativa de las calderas (Demirbas, 2004; McKendry, 2002). En el contexto latinoamericano, estudios de De Sena et al. (2008) y Pulgarín et al. (2022) evidencian que el secado natural es una estrategia viable para mejorar el comportamiento energético de estos residuos bajo condiciones tropicales. Estos antecedentes sustentan la necesidad de evaluar el desempeño del biosólido generado por Industrial Comercial San Martín, considerando procesos de acondicionamiento y combustión en condiciones industriales reales.

Industrial Comercial San Martín es una empresa nicaragüense líder en el procesamiento y exportación de carne bovina, con una trayectoria consolidada en la industria

cárnea. Ubicada en Nandaime, Granada, se destaca como el mayor exportador de carne de res en Nicaragua, abasteciendo mercados nacionales e internacionales. Con un enfoque en la sostenibilidad, la empresa ha implementado procesos innovadores como la producción de biogás a partir de residuos orgánicos, lo que le permite reducir su impacto ambiental y mejorar su eficiencia energética.

La empresa busca optimizar el aprovechamiento de los subproductos generados en el matadero, reduciendo el desperdicio y maximizando su valor. El proyecto de reutilización de biosólidos en procesos de cogeneración de energía y la valorización de residuos contribuye a un modelo productivo más sostenible. Estas estrategias permiten mejorar la eficiencia operativa y reducir la huella ambiental, alineándose con las tendencias de globales.

Con el propósito de consolidar el modelo de economía circular y las estrategias de sostenibilidad adoptadas por la empresa, se realizó el Estudio de Viabilidad para la Cogeneración de Energía a partir de Biosólidos generados en el sistema de biodigestores de industrial Comercial San Martín. Esta iniciativa forma parte de la RED BIOFUTURO: Productos de valor agregado desde residuos: (Bio)tecnología para un futuro sostenible, impulsada por el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), y se ejecutó mediante la colaboración técnico-científica de investigadores y estudiantes de la Universidad Thomas More. La articulación entre el sector empresarial, la academia y las redes internacionales de investigación constituye un pilar estratégico para la generación de conocimiento aplicado y el desarrollo de soluciones sostenibles de alto impacto.

II. Objetivos

2.1 Objetivo General

Analizar la factibilidad técnica del aprovechamiento de biosólidos generados en el biodigestor de Industrial Comercial San Martín como combustible para generación de vapor en caldera de biomasa.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar la producción de biosólidos en el biodigestor de Industrial Comercial San Martín, estableciendo su disponibilidad como insumo energético.
- Caracterizar el poder calorífico del biosólido en diferentes condiciones de humedad y definir las condiciones óptimas de acondicionamiento mediante secado natural en patio hasta alcanzar un 20% de humedad.
- Verificar el desempeño técnico del biosólido acondicionado en la generación de vapor, mediante prueba experimental en la caldera industrial de la Empresa E-Chamorro.

- Determinar la inversión del proyecto y el beneficio económico para la empresa.

III. Preguntas de investigación

3.1 Pregunta general de investigación

- ¿Cuál es la cantidad promedio de biosólidos generados por Industrial Comercial San Martín en su sistema de biodigestores?
- ¿Qué relación existe entre la cantidad de reses sacrificadas y la producción de biosólidos?

3.2 Producción y disponibilidad

- ¿Cómo varía el poder calorífico del biosólido según su nivel de humedad?
- ¿Cuál es el contenido de cenizas del biosólido y cómo afecta su eficiencia energética?

3.3 Caracterización energética

- ¿Qué condiciones de secado natural permiten alcanzar el nivel óptimo de humedad (20 %) para su uso en calderas de biomasa?
- ¿Qué factores ambientales o de manejo influyen en la eficiencia del proceso de secado?

3.4 Acondicionamiento del biosólido

- ¿Qué condiciones de secado natural permiten alcanzar el nivel óptimo de humedad (20 %) para su uso en calderas de biomasa?
- ¿Qué factores ambientales o de manejo influyen en la eficiencia del proceso de secado?

3.5 Evaluación técnica en caldera

- ¿Cuál es el desempeño del biosólido acondicionado en términos de estabilidad de combustión, generación de vapor y presión?
- ¿Qué factores pueden alterar la eficiencia térmica de la caldera durante la combustión del biosólido?

3.6 Análisis económico

- ¿Cuál es la inversión estimada necesaria para implementar un sistema de cogeneración basado en biosólidos?
- ¿Qué ahorro económico representa la sustitución del diésel por biosólidos como combustible alternativo?

3.7 Aplicación al modelo de economía circular

- ¿De qué manera el aprovechamiento de biosólidos como combustible contribuye al modelo de economía circular y sostenibilidad de Industrial Comercial San Martín?

IV. Justificación

El presente estudio se justifica en la necesidad de implementar soluciones sostenibles para la gestión de los residuos orgánicos generados por la industria cárnica en Nicaragua. Los biosólidos producidos en el sistema de biodigestores de Industrial Comercial San Martín representan un subproducto con alto potencial energético que, al ser aprovechado adecuadamente, puede transformarse en una fuente alternativa de energía limpia para los procesos térmicos de la empresa.

La valorización energética de los biosólidos mediante su uso como combustible en calderas de biomasa contribuye de manera directa a la reducción de la huella de carbono corporativa, al sustituir parcialmente el consumo de combustibles fósiles como el diésel. Esta sustitución disminuye las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y otros gases de efecto invernadero asociados a la generación de vapor, fortaleciendo el compromiso ambiental de la empresa y su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7, 12 y 13) relacionados con energía asequible y no contaminante, producción responsable y acción por el clima.

Desde el punto de vista técnico, la investigación permite generar información científica sobre el comportamiento energético del biosólido, evaluando variables como la humedad, el poder calorífico y la estabilidad de combustión en condiciones industriales reales. Estos resultados aportan una base sólida para el diseño de sistemas de cogeneración de energía basados en residuos orgánicos y para la optimización del proceso de secado natural, clave para alcanzar una eficiencia térmica adecuada.

En el ámbito económico, el estudio demuestra el potencial de ahorro derivado de la sustitución del diésel por biosólidos, reduciendo costos operativos y aumentando la competitividad de la empresa. Además, la implementación de este tipo de tecnologías refuerza la reputación ambiental de Industrial Comercial San Martín, al integrar la innovación, la eficiencia energética y la responsabilidad ambiental dentro de su modelo de economía circular.

En conjunto, esta investigación constituye un aporte significativo al desarrollo sostenible de la industria nacional, al proponer una alternativa viable para la generación de energía renovable a partir de residuos, con beneficios económicos, ambientales y sociales de largo alcance.

V. Limitaciones

El presente estudio presenta una serie de limitaciones derivadas de su alcance temporal, técnico y operativo, las cuales deben considerarse al interpretar los resultados obtenidos. En primer lugar, la investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental aplicado, limitado a un periodo comprendido entre marzo de 2024 y febrero de 2025, por lo que los resultados reflejan las condiciones específicas de ese intervalo y no contemplan variaciones estacionales o de largo plazo en la producción y composición de los biosólidos.

Asimismo, la fase experimental se llevó a cabo exclusivamente en dos instalaciones localizadas en el departamento de Granada, Industrial Comercial San Martín y la empresa E-Chamorro, lo que restringe la extrapolación de los resultados a otros contextos industriales o a sistemas de combustión con características distintas.

Desde el punto de vista técnico, la investigación se centró únicamente en la caracterización energética del biosólido (humedad, poder calorífico y contenido de cenizas), en su acondicionamiento mediante secado natural y en su desempeño en la generación de vapor. No se abordaron análisis de impacto ambiental, sanitario ni normativo, los cuales podrían complementar la evaluación integral del proyecto en futuras etapas.

Entre las limitaciones operativas más relevantes se destaca la realización de una sola prueba experimental con una duración limitada de 2.5 horas. Este tiempo no permitió evaluar el comportamiento de la caldera frente a variables como la eficiencia térmica sostenida, la formación de escorias o la acumulación de cenizas a largo plazo. Del mismo modo, factores

ambientales como la variación de la humedad relativa, la temperatura o la radiación solar no fueron analizados de manera sistemática durante el proceso de secado.

Finalmente, se reconoce que el estudio constituye una evaluación inicial en condiciones controladas, cuyo propósito principal fue establecer una base técnica preliminar para el uso de biosólidos como combustible alternativo en calderas de biomasa. Por tanto, se recomienda desarrollar investigaciones complementarias que amplíen la escala temporal, incorporen variables ambientales y consideren análisis económicos y de sostenibilidad más detallados.

VI. Variables

Metodología

El estudio siguió un enfoque experimental aplicado, con pruebas en condiciones industriales reales. El uso del biosólido de Industrial Comercial San Martín como combustible en calderas de biomasa es técnica y económicamente viable, siempre que se garantice un secado adecuado (< 25 % de humedad).

El proyecto contribuye al modelo de economía circular, reduciendo residuos y generando energía sostenible a partir de subproductos industriales.

El presente estudio considera un conjunto de variables que permiten analizar la factibilidad técnica y económica del uso de biosólidos generados en el biodigestor de Industrial Comercial San Martín como combustible alternativo para la generación de vapor en una caldera de biomasa.

6.1 Variable dependiente

Producción de vapor (kg/h): representa la cantidad de vapor generada por la caldera durante la combustión del biosólido acondicionado. Este indicador permite evaluar el desempeño energético del combustible y la eficiencia del proceso.

6.2 Variables independientes

Contenido de humedad del biosólido (%): expresa el porcentaje de agua presente en el material. Es una variable crítica, pues influye directamente en el poder calorífico y en la estabilidad de la combustión.

Poder calorífico del biosólido (Btu/lb): indica la cantidad de energía liberada por unidad de masa durante la combustión. Su valor depende del nivel de humedad y de las características químicas del biosólido

Contenido de cenizas (%): corresponde a la fracción inorgánica residual que queda después de la combustión y afecta la eficiencia térmica y el manejo de residuos.

6.3 Variables de control:

Presión de operación de la caldera (bar): medida de la presión interna durante la prueba, mantenida dentro de un rango estable para garantizar condiciones comparables.

Tasa de alimentación del combustible (kg/h): cantidad de biosólido introducida por hora, controlada para asegurar uniformidad en la combustión.

VII. Categorías, temas y patrones de emergencia de la investigación.

Del análisis de la información obtenida en el estudio surgieron varias categorías y patrones que permiten comprender la factibilidad técnica y ambiental del uso de biosólidos como combustible. En primer lugar, la caracterización energética del biosólido mostró que la humedad es el factor más determinante, pues influye directamente en el poder calorífico y en la eficiencia de combustión. En cuanto al desempeño operativo, se observó que la caldera mantiene una producción de vapor estable únicamente cuando el biosólido presenta un nivel adecuado de secado y se alimenta de manera uniforme. También emergió la influencia significativa de las condiciones ambientales, dado que el secado natural depende en gran medida de la temperatura y la humedad relativa, presentando rehumectación en horas nocturnas. En el ámbito económico, los resultados señalan que la sustitución parcial del diésel por biosólido permite proyectar ahorros importantes en el mediano plazo. Desde la perspectiva ambiental, se identificó un aporte directo a la reducción de la huella de carbono mediante la valorización energética de un residuo que antes no se aprovechaba. Finalmente, se reconocieron limitaciones relacionadas con la duración reducida de la prueba experimental y la falta de evaluación continua, lo cual sugiere la necesidad de realizar estudios adicionales para validar el comportamiento del biosólido en operación prolongada.

VIII. Supuestos básicos

Los supuestos básicos de la presente investigación establecen que el biosólido generado en el biodigestor mantiene una composición relativamente constante durante el periodo analizado y que las condiciones operativas de la caldera se mantuvieron estables durante la prueba, permitiendo atribuir los resultados principalmente al comportamiento del combustible. Asimismo, se asume que el secado natural realizado representa condiciones ambientales típicas de la zona, por lo que la humedad obtenida es coherente con escenarios reales de operación. Se considera también que la producción de vapor registrada durante las 2.5 horas de prueba es representativa del desempeño que podría lograrse en periodos más prolongados bajo condiciones similares. En el ámbito económico, se parte del supuesto de que los precios de combustibles y costos operativos empleados en el análisis reflejan valores actuales y aplicables. Finalmente, se asume que las emisiones y la eficiencia térmica alcanzadas con el biosólido no presentan desviaciones significativas respecto a biomasa tradicional y que la sustitución parcial de diésel contribuye proporcionalmente a la reducción de la huella de carbono de la empresa.

IX. Contexto de la investigación

La presente investigación se desarrolla en el marco de la creciente necesidad de que las industrias agroalimentarias, particularmente las del sector cárnico, adopten prácticas más sostenibles para la gestión de sus residuos y la optimización de sus procesos energéticos. En Nicaragua, como en muchos países de la región, las empresas enfrentan desafíos relacionados con el tratamiento adecuado de los biosólidos generados por sistemas de biodigestión, así como con los altos costos derivados del uso de combustibles fósiles para la generación de vapor en sus operaciones productivas. Ante este panorama, surge la necesidad de explorar alternativas que permitan valorizar estos residuos orgánicos y aprovechar su potencial energético. Industrial Comercial San Martín, ubicada en el departamento de Granada, representa un caso relevante al producir biosólidos con características susceptibles de uso energético, pero sin contar con información técnica suficiente para determinar su viabilidad como combustible en calderas de biomasa. En este contexto, el estudio se orienta a evaluar el comportamiento del biosólido durante su acondicionamiento y combustión, la eficiencia del proceso, su impacto económico y su contribución a la reducción de la huella de carbono. Asimismo, se enmarca en los esfuerzos globales por impulsar la economía circular, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover el uso de energías renovables a partir de recursos disponibles localmente. De esta manera, la investigación se sitúa en una intersección entre la ingeniería, la sostenibilidad ambiental y la innovación industrial, proporcionando información técnica valiosa para la toma de decisiones y el desarrollo de soluciones energéticas más limpias y eficientes.

X. Marco Teórico

La valorización energética de residuos orgánicos ha sido ampliamente estudiada como una estrategia efectiva para mitigar los desafíos ambientales y económicos asociados al incremento en la generación de desechos y la dependencia de combustibles fósiles (Zhang et al., 2020; Li et al., 2019). Diversas investigaciones señalan que los biosólidos provenientes de la industria agroalimentaria, particularmente del sector cárnico, constituyen una fuente energética constante y susceptible de aprovechamiento mediante procesos termoquímicos o biológicos (González-García et al., 2018; Khan et al., 2021).

Los biosólidos se definen como el residuo semisólido generado a partir del tratamiento de aguas residuales o digestión anaerobia de materia orgánica. Estudios de la EPA (1999) y de Zhang et al. (2019) destacan que estos materiales contienen mezclas de materia orgánica, humedad y minerales, cuya composición varía según el tipo de residuo procesado. Investigaciones aplicadas a la industria cárnica muestran que la composición de biosólidos depende de la proporción de sangre, grasas y fibras presentes en los subproductos de matanza, lo que incide directamente en su contenido energético y en la selección de métodos de valorización (Zhang et al., 2020; Li et al., 2019).

La digestión anaerobia, proceso central en la producción de biosólidos, ha sido ampliamente caracterizada en la literatura científica. Según Appels et al. (2008) y Mata-Alvarez et al. (2014), esta degradación biológica ocurre en ausencia de oxígeno mediante etapas de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, produciendo biogás y un residuo estabilizado denominado digestato. Estudios recientes indican que, aunque la digestión anaerobia reduce significativamente la carga orgánica, el contenido de humedad

permanece elevado (Khan et al., 2021; Li et al., 2019), limitando la eficiencia del biosólido como combustible sin un proceso de acondicionamiento previo.

El secado natural de biosólidos se presenta como una alternativa viable y de bajo costo en climas tropicales. Investigaciones de Bhattacharya et al. (2012) y Kumar et al. (2015) muestran que la reducción de humedad mejora notablemente el Poder Calorífico Inferior (PCI), aumentando la eficiencia energética durante la combustión. Estos estudios enfatizan que la humedad es la variable más influyente en el comportamiento térmico del biosólido, ya que requiere energía adicional para evaporarse antes de iniciar la combustión efectiva.

La combustión de biomasa, incluyendo biosólidos, ha sido objeto de numerosos estudios que analizan el impacto de la composición y humedad sobre la eficiencia y estabilidad del proceso (Demirbas, 2004; McKendry, 2002). En calderas, la combustión se realiza en etapas de secado, pirólisis, combustión de gases volátiles y oxidación del carbón fijo. La literatura evidencia que un contenido elevado de humedad o volátiles puede generar combustión incompleta, emisiones de humo y fluctuaciones en la producción de vapor (Demirbas, 2004; Liu et al., 2018). Además, la correcta distribución del aire primario y secundario se ha identificado como un factor determinante en la eficiencia térmica de sistemas industriales (McKendry, 2002).

El contenido de cenizas es otro aspecto crítico evaluado en estudios recientes. Zhang et al. (2020) y González-García et al. (2018) destacan que la composición mineral del biosólido influye en fenómenos como slagging y fouling, que afectan la transferencia de calor

y aumentan los costos de mantenimiento. Por ello, la caracterización de las cenizas se considera fundamental para evaluar la factibilidad técnica del biosólido como combustible.

Desde una perspectiva ambiental y de economía circular, la valorización energética de biosólidos ha mostrado beneficios claros. Investigaciones de Li et al. (2019) y Khan et al. (2021) señalan que este enfoque reduce la presión sobre vertederos, disminuye la contaminación de suelos y cuerpos de agua, sustituye parcialmente combustibles fósiles y contribuye a la reducción de emisiones de metano y CO₂. Estas evidencias respaldan la incorporación de residuos orgánicos al ciclo productivo como alternativa sostenible en la industria cárnica.

Finalmente, los marcos regulatorios establecidos por la EPA (40 CFR Part 503), la Unión Europea y diversos países latinoamericanos, incluyendo Nicaragua, garantizan que el aprovechamiento de biosólidos cumpla con estándares de emisiones, gestión de subproductos y seguridad sanitaria (EPA, 1999; UNEP, 2017). Investigaciones recientes confirman que el cumplimiento de estas normativas es determinante para la viabilidad técnica y ambiental del uso de biosólidos como combustible (Zhang et al., 2020; González-García et al., 2018).

En síntesis, la literatura revisada evidencia que la valorización energética de biosólidos depende de múltiples factores: composición y humedad del residuo, propiedades termoquímicas, comportamiento en la combustión y cumplimiento regulatorio. Estos elementos fundamentan la evaluación de la factibilidad técnica y la sostenibilidad del uso de biosólidos como combustible alternativo en la industria cárnica nicaragüense.

10.1 Estado del arte

El estudio del aprovechamiento energético de biosólidos ha ganado relevancia a nivel internacional debido a los esfuerzos por sustituir combustibles fósiles y mejorar la gestión de residuos orgánicos. En Europa, Nordin et al. (2020) analizaron el uso de biosólidos en calderas de biomasa, concluyendo que la humedad y el contenido de cenizas son las variables más influyentes en su rendimiento. En Asia, Wang et al. (2019) evaluaron la pirólisis y gasificación de digestatos, destacando su potencial para generar biochar y gas combustible. En Estados Unidos, la EPA ha impulsado investigaciones para optimizar la recuperación energética de lodos, promoviendo tecnologías de transferencia térmica y control de emisiones.

En América Latina, los avances incluyen estudios realizados en Brasil, Colombia y Costa Rica. En Brasil, De Sena et al. (2008) demostraron que biosólidos agroindustriales pueden alcanzar poderes caloríficos competitivos tras procesos adecuados de deshidratación. En Colombia, Pulgarín et al. (2022) analizaron el comportamiento térmico de residuos agroindustriales en calderas, resaltando la relevancia del secado natural en climas tropicales. En Costa Rica, Ruiz Terán (2020) investigó el comportamiento de cenizas provenientes de digestatos, destacando su impacto en la formación de escorias y depósitos en superficies internas de calderas.

Sin embargo, la literatura científica revela una brecha importante: la mayoría de los estudios se realizan en laboratorio o en plantas piloto bajo condiciones controladas, mientras que existe poca evidencia documentada sobre la operación real de biosólidos como combustible en calderas industriales. La presente investigación contribuye a llenar esta

brecha mediante la evaluación experimental en condiciones operativas reales, proporcionando datos valiosos sobre producción de vapor, estabilidad de combustión, comportamiento de cenizas y eficiencia energética en un entorno industrial.

10.2 Perspectiva teórica asumida

La investigación adopta una perspectiva teórica interdisciplinaria que integra principios de ingeniería energética, termoquímica, sostenibilidad ambiental y economía circular. Desde la ingeniería térmica, se asume el modelo teórico que explica la combustión de biomasa mediante etapas sucesivas secado, pirólisis, combustión volátil y oxidación del carbón fijo, lo que permite comprender cómo variables como la humedad, el contenido de cenizas y la composición del biosólido influyen directamente en su rendimiento energético y en la estabilidad operativa de la caldera

Desde la sostenibilidad y la gestión ambiental, se adopta el marco conceptual de la economía circular, que promueve la transformación de residuos en recursos útiles, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y optimizando el uso de materiales dentro del proceso productivo. Asimismo, se incorpora la teoría del ciclo de carbono biogénico, que establece que las emisiones provenientes de biomasa forman parte de un ciclo natural de corto plazo, lo que permite considerar al biosólido un combustible con menor impacto climático que los combustibles fósiles tradicionales.

Finalmente, desde la perspectiva de valorización de residuos, se asume el enfoque de aprovechamiento energético sostenible, el cual señala que la selección de tecnologías debe considerar no solo aspectos técnicos, sino también económicos, regulatorios y ambientales.

Este marco teórico orienta el análisis de viabilidad del biosólido como combustible y sustenta la interpretación de los resultados experimentales obtenidos en la caldera industrial.

XI. Métodos

11.1 Tipo de diseño

Mixto, ya que se integraron datos cuantitativos (humedad del biosólido, poder calorífico, producción de vapor, tiempo de combustión, datos energéticos) y datos cualitativos (observación del comportamiento de combustión, entrevistas con personal técnico, descripciones operativas).

11.2 Perspectiva cuantitativa

Se analizaron variables numéricas como: toneladas de biosólido producido, humedad porcentual, poder calorífico, presión de la caldera, generación de vapor y duración de la prueba.

11.2.1 *Tipo de investigación*

La investigación es descriptiva-explicativa porque describe las características físicas y químicas del biosólido y explica su comportamiento en la combustión y generación de vapor. También es experimental aplicada, al realizar una prueba real en una caldera industrial.

11.2.2 *Población y muestra*

La población está compuesta por el personal técnico, ambiental y operativo de Industrial Comercial San Martín y de la caldera de E-Chamorro.

La muestra incluye a los trabajadores involucrados directamente en la operación del biodigestor y la prueba experimental.

11.2.3 Variables

Variable independiente: biosólido (humedad, PCI, cenizas)

Variable dependiente: generación de vapor, estabilidad de combustión, eficiencia térmica.

Variables de control: condiciones de la caldera, flujo de aire, tiempo de prueba, condiciones

11.2.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Se emplearon:

Revisión documental (informes técnicos, registros de producción, caracterización del biosólido).

Prueba experimental controlada en caldera.

Entrevistas semiestructuradas al personal técnico.

Instrumentos: termómetros industriales, higrómetros, registros de presión, balanza, hoja de monitoreo.

11.2.5 Confiabilidad y validez de los instrumentos.

Se garantizó mediante:

Triangulación con fuentes oficiales (MARENA, estándares de biomasa, reportes internos).

Uso de equipos industriales calibrados (manómetros, medidores de humedad, registros automáticos).

Aplicación de procedimientos de medición estándar y repetibles durante la prueba experimental.

11.2.6 Procesamiento de datos y análisis de la información

El procesamiento de los datos cuantitativos se realizó mediante la organización, clasificación y tabulación de las mediciones obtenidas durante la caracterización del biosólido y de la prueba experimental en la caldera de biomasa. Las variables analizadas incluyeron humedad, poder calorífico, contenido de cenizas, presión de operación, producción de vapor y duración de la combustión. Los datos fueron ordenados en matrices y se aplicó un análisis descriptivo para calcular promedios, variaciones porcentuales y tendencias operativas. Para la interpretación se compararon los valores obtenidos con estándares teóricos de combustión de biomasa y literatura científica relevante. Asimismo, se aplicó una triangulación entre los registros instrumentales, las observaciones de la prueba y los documentos técnicos proporcionados por la empresa.

11.3 Perspectiva cualitativa

La investigación incorpora una perspectiva cualitativa complementaria para comprender el contexto operativo, las percepciones del personal técnico y las condiciones reales de funcionamiento de la caldera y del biodigestor. Este enfoque permitió interpretar los factores no cuantificables que influyen en la combustión del biosólido, tales como prácticas operativas, experiencia del personal, dificultades técnicas y observaciones sobre el comportamiento del combustible durante la prueba.

11.3.1. Enfoque cualitativo asumido y su justificación

Se asumió un enfoque cualitativo descriptivo–interpretativo, orientado a comprender las experiencias, criterios técnicos y percepciones del personal involucrado en el manejo del biosólido, su secado y su combustión. Este enfoque se justifica porque la operación de una caldera industrial y el uso de un combustible no convencional requieren información que trasciende los datos numéricos, incorporando elementos subjetivos y situacionales. Las observaciones y opiniones del personal aportaron información valiosa para interpretar fenómenos como estabilidad de la llama, manejo del material, dificultades de alimentación, acumulación de cenizas y comportamiento térmico general.

11.3.2 Muestra teórica y sujetos del estudio

La muestra cualitativa fue intencional y teórica, conformada por los sujetos que poseen información clave respecto al proceso. Incluyó:

Personal técnico de Industrial Comercial San Martín encargado del biodigestor.

Operadores de la caldera de biomasa de E-Chamorro.

Personal ambiental y de mantenimiento involucrado en la manipulación del biosólido.

Encargados de operaciones que brindaron información sobre costos, logística y viabilidad.

Esta selección se basó en el criterio de experiencia directa y conocimiento especializado, lo cual es coherente con el enfoque cualitativo aplicado.

11.3.3 Métodos y técnicas de recolección de datos

Las técnicas cualitativas utilizadas fueron:

Entrevistas semiestructuradas dirigidas al personal técnico y operativo para comprender procesos, percepciones y dificultades.

Observación directa durante el proceso de secado del biosólido y la prueba de combustión en la caldera.

Revisión documental cualitativa, que incluyó manuales operativos, informes internos, bitácoras técnicas y reportes ambientales.

11.3.4 Métodos y técnicas para el procesamiento de datos y análisis de información

Categorización temática, identificando patrones en las entrevistas y observaciones (por ejemplo: estabilidad de combustión, manejo operativo, problemas de cenizas, percepción de viabilidad).

Codificación abierta y axial, agrupando fragmentos relevantes de las entrevistas en categorías conceptuales y operativas.

Triangulación con los datos cuantitativos (producción de vapor, humedad, PCI) para validar coherencias y discrepancias.

Análisis interpretativo, orientado a explicar cómo los factores operativos y humanos influyen en el desempeño del biosólido como combustible.

11.3.5 Criterios de calidad, credibilidad, confiabilidad, confirmabilidad, transferibilidad y triangulación.

Credibilidad

Se garantizó mediante la revisión conjunta de información con los operadores y validación de percepciones con participantes clave (member checking).

Confiabilidad

Se utilizaron procedimientos sistemáticos de registro, entrevistas guiadas y bitácoras estructuradas para asegurar consistencia en la recolección de datos.

Confirmabilidad

Los hallazgos se respaldaron mediante evidencias verificables, como registros técnicos de la caldera, notas de campo y documentos oficiales.

Transferibilidad

Las descripciones detalladas del contexto, condiciones operativas y características del biosólido permiten extrapolar los resultados a situaciones similares en otras industrias agroalimentarias.

Triangulación

Se aplicó triangulación de datos cuantitativos, cualitativos y documentales para fortalecer la robustez de las conclusiones. Esto incluyó contrastar mediciones industriales con observaciones y testimonios del personal técnico.

XII. Resultados o hallazgos

12.1 Producción de biosólidos en el biodigestor

Para el presente estudio se tomó como periodo de análisis de marzo 2024 a febrero 2025. Se procedió a solicitar a la empresa la información de la cantidad reses sacrificadas en el periodo y la cantidad de biosólido que sale del biodigestor, el resumen general de la generación de biosólidos es el siguiente:

- Total de biosólido generado: 20,969.40 m³, equivalentes a 16,775.52 toneladas en el período analizado (marzo 2024 – febrero 2025).
- Promedio mensual: 1,747.45 m³ o 1,397.96 toneladas.
- Promedio diario: 46.60 toneladas/día, con una tasa promedio de 3.88 toneladas/hora.
- Total de reses sacrificadas: 154,697 unidades, con un promedio mensual de 12,891 reses.
- Indicador promedio de generación de biosólido por res sacrificada es de 112.33 kg

Tabla 1. Generación de biosólido mensual.

Mes	Biosólido (m ³)/mes	Toneladas /mes	Tonelada/Días	Toneladas /hora (trabajando 12 horas al día)	Reses sacrificadas (unidades)	kg biosólido /res
mar-24	2,321.98	1,857.58	61.92	5.16	11,390	163
abr-24	2,252.90	1,802.32	60.08	5.01	12,019	150
may-24	2,784.04	2,227.23	74.24	6.19	11,516	193
jun-24	1,770.48	1,416.38	47.21	3.93	11,638	122
jul-24	1,798.16	1,438.53	47.95	4.00	10,815	133
ago-24	3,078.98	2,463.18	82.11	6.84	14,494	170
sep-24	1,435.49	1,148.39	38.28	3.19	13,794	83
oct-24	1,002.23	801.78	26.73	2.23	15,316	52
nov-24	1,362.45	1,089.96	36.33	3.03	12,057	90
dic-24	1,097.63	878.10	29.27	2.44	10,455	84
ene-25	1,040.56	832.45	27.75	2.31	14,177	59
feb-25	1,024.50	819.60	27.32	2.28	17,026	48
Total	20,969.40	16,775.52	559.18	46.60	154,697.00	1,347.96
Promedio	1,747.45	1,397.96	46.60	3.88	12,891.42	112.33

La generación de biosólido no depende linealmente del número de reses sacrificadas.

Por ejemplo, en octubre 2024 y febrero 2025, aunque el número de reses fue alto, la producción de biosólido fue relativamente baja. Esto se debe a que solamente estaba operando uno de los biodigestores (uno de ellos se encuentra en mantenimiento).

De acuerdo, a la información proporcionada en la tabla 1, se calculó el indicador promedio en 112.33 kg de biosólido por res. Cabe mencionar que el biosólido reportado en la tabla 1 se encuentra a una humedad del 62% (a la salida del biodigestor).

La interpretación técnica para cogeneración de energía indica que:

- El promedio diario de 46.6 t/día es suficiente para planificar un sistema de cogeneración de energía a pequeña o mediana escala.
- Los meses de baja generación representan una oportunidad para almacenamiento o ajuste en la alimentación del biodigestor, de modo que el suministro a la caldera sea más constante.
- El indicador kg biosólido/res permite estimar la producción de combustible de forma directa según el número de reses sacrificadas, útil para dimensionar la caldera y planificar la energía generada.

La información recopilada en este acápite permitirá conocer la cantidad de vapor que se puede obtener del biosólido generado.

12.2 Caracterización energética del biosólido

La caracterización energética del biosólido tiene como objetivo determinar el potencial como combustible para generación de vapor en caldera de biomasa. Este análisis permitió establecer los parámetros de humedad y poder calorífico que garantizan un desempeño eficiente y seguro durante la combustión.

Se recolectaron muestras del biosólido directamente desde el biodigestor, con una humedad inicial superior al 62%. Las muestras fueron secadas bajo condiciones controladas para obtener los diferentes niveles de humedad. Se midió el poder calorífico en Btu/lb

mediante equipos de laboratorio, y en algunas muestras también se determinó el contenido de cenizas.

El poder calorífico fue determinado para de una misma muestra de biomasa a diferentes niveles de humedad. Los ensayos permiten observar el comportamiento energético de la muestra conforme disminuye su contenido de agua¹. Los datos fueron recolectados entre el 20 y el 24 de junio de 2025 y su análisis de llevó a cabo en el laboratorio de la empresa Cogeneración Green Power.

¹Ver anexo 10.1. Resultados por nivel de humedad del biosólido.

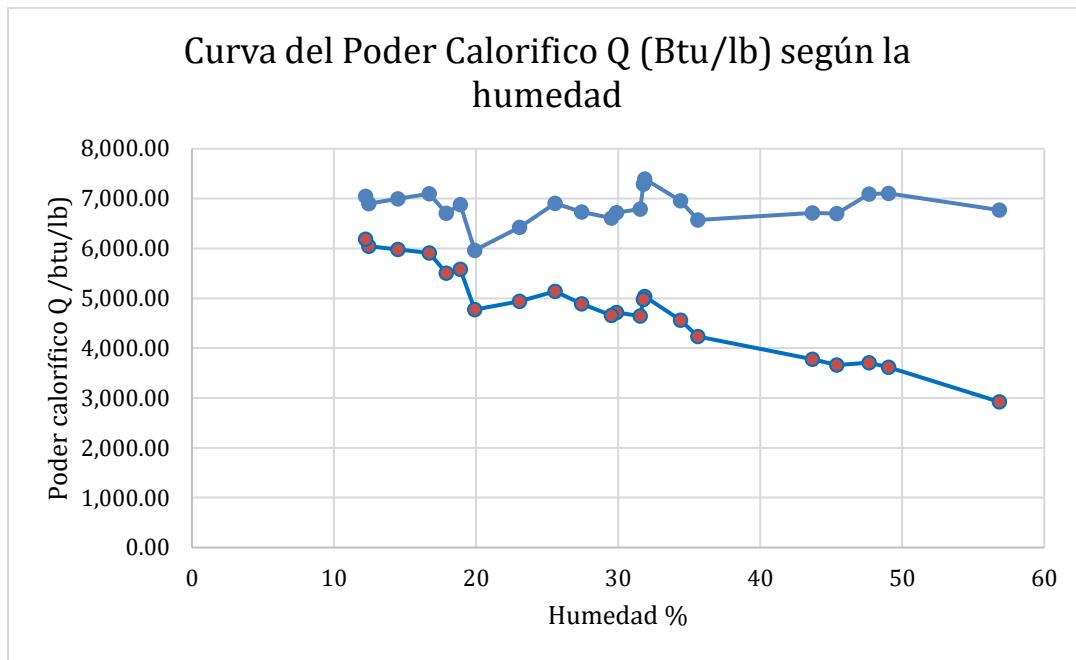
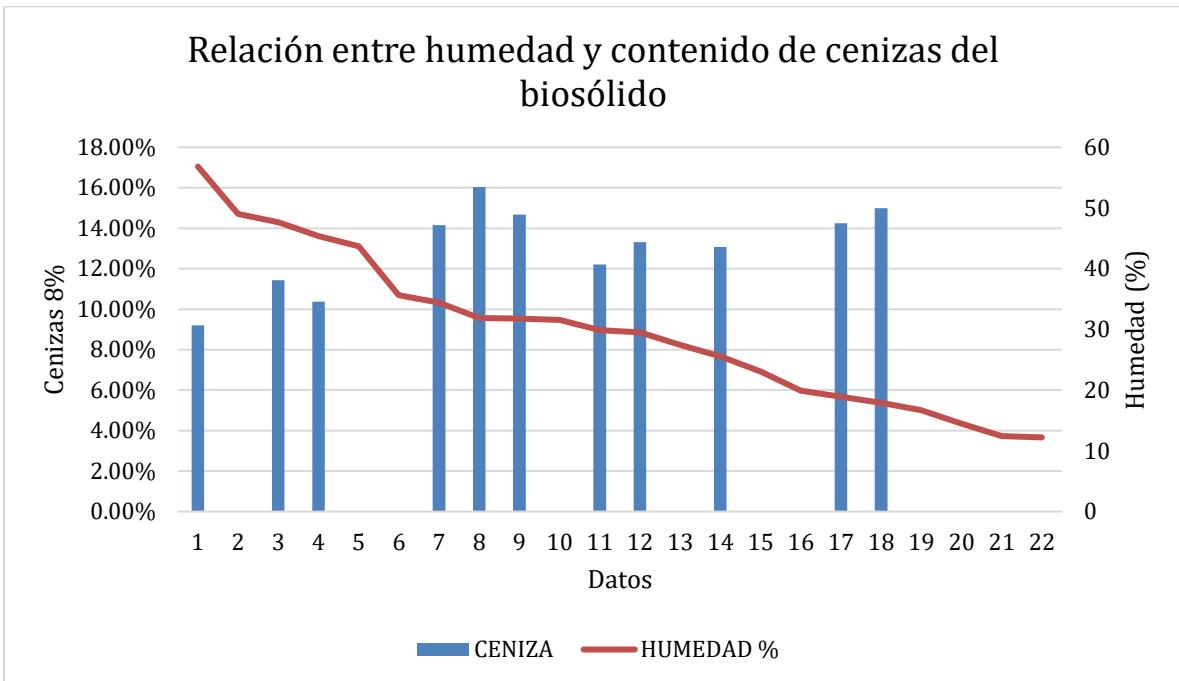


Gráfico 1. Relación entre humedad y poder calorífico.



Gràfico 2. Relación entre humedad y contenido de cenizas del biosólido

En la gráfica 2, se muestra la relación entre humedad del biosólido y su contenido de cenizas. Aunque no es una tendencia lineal clara, se observa que en niveles de humedades moderadas (30% -35%) algunas muestras registran un contenido de cenizas superior a 14%.

Las muestras con mayor humedad tienden a presentar un mayor contenido de cenizas, lo que puede afectar negativamente en la eficiencia de la combustión.

- El biosólido generado en el biodigestor presenta un potencial energético considerable cuando se reduce su contenido de humedad. En su estado natural (>50% de humedad), su poder calorífico cae (< 3,000 Btu/lb) cual compromete su uso directo como combustible directo en la caldera.

- La reducción de humedad mejora notablemente el poder calorífico. En niveles de humedad entre 15% y 25%, se registran valores de Q superiores a 5,600 Btu/lb, lo que lo hace técnicamente viable para pruebas de combustión, por lo cual es importante el secado previo del material.
- Las muestras de mayor humedad tienden a presentar también un mayor contenido de ceniza (>14%), lo cual podría generar problemas operativos como formación de escoria, reducción de eficiencia térmica y aumento en la producción de residuos sólidos post-combustión.

A continuación, se analizan los principales hallazgos:

A. Tendencia general: Existe una relación inversa clara entre la humedad y el poder calorífico netos (Q). Esto es esperado: a mayor humedad, menor poder calorífico. Esto es debido que el agua requiere energía para evaporarse durante la combustión, reduciendo así la energía útil.

B. Poder calorífico útil según rango de humedad:

- 20% de humedad; Q promedio \approx 5,800 Btu/lb.
- 20% -35% de humedad; Q promedio \approx 4,800 -5,100 Btu/lb.
- 35% -50% de humedad; Q promedio \approx 3,600 - 4,200 Btu/lb.
- >50% de humedad; Q cae a menos de 3,000 Btu/lb.

C. Punto de corte técnico para uso de la caldera:

Para la mayoría de las calderas de biomasa, se recomienda un poder calorífico mínimo² de 4,000 Btu/lb. Por tanto, se debe de reducir la humedad del biosólido al menos al 35% o menos, si es posible, para garantizar una combustión eficiente.

D. Contenido de cenizas

Las muestras con un contenido de cenizas superior al 14% (ejemplo, 16.03%, 14.99%) presentan también valores reducidos de poder calorífico, lo que sugiere un efecto combinado negativo de la humedad y el contenido de inerte.

Este factor puede incidir en la formación de escorias y en la acumulación de residuos sólidos en el sistema de combustión.

- El biosólido, en su estado natural (es decir, con humedad > 50%) presenta un poder calorífico inferior a 3,000 Btu/lb, lo que lo hace inviable para combustión directa.
- En el rango del 15 % – 25% de humedad, el poder calorífico mejora notablemente ($Q > 5,600$ Btu/lb), haciéndolo apto para pruebas en caldera.
- El contenido de cenizas varía entre el 9% y 16%, lo que puede afectar el rendimiento térmico del sistema y aumentar la cantidad de residuos generados tras la combustión.

² https://www.shastacounty.gov/media/7541?utm_source=chatgpt.com.

Para realizar las pruebas a nivel industrial (prueba en caldera), se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Implementar un sistema de secado previo al uso del biosólido como combustible, con el objetivo de alcanzar niveles de humedad iguales o menores al 35%, preferiblemente entre 15% y 25%, para asegurar un poder calorífico competitivo (>5,600 Btu/lb). Dado que no se cuenta con un equipo para el presecado para el biosólido, se realizó un secado natural en patio.
- Monitorear el contenido de cenizas en los lotes de biosólido destinados a combustión. Se recomienda evitar el uso de muestras con más de 14% de cenizas debido a los efectos negativos en la operación de la caldera.

La caracterización energética demostró que el biosólido producido en Industrial Comercial San Martín posee un potencial adecuado como combustible para calderas de biomasa, siempre que se mantenga un acondicionamiento que reduzca la humedad a niveles cercanos al 20%. Esta etapa fue fundamental para planificar las pruebas posteriores en caldera industrial y garantizar la eficiencia en la generación de vapor.

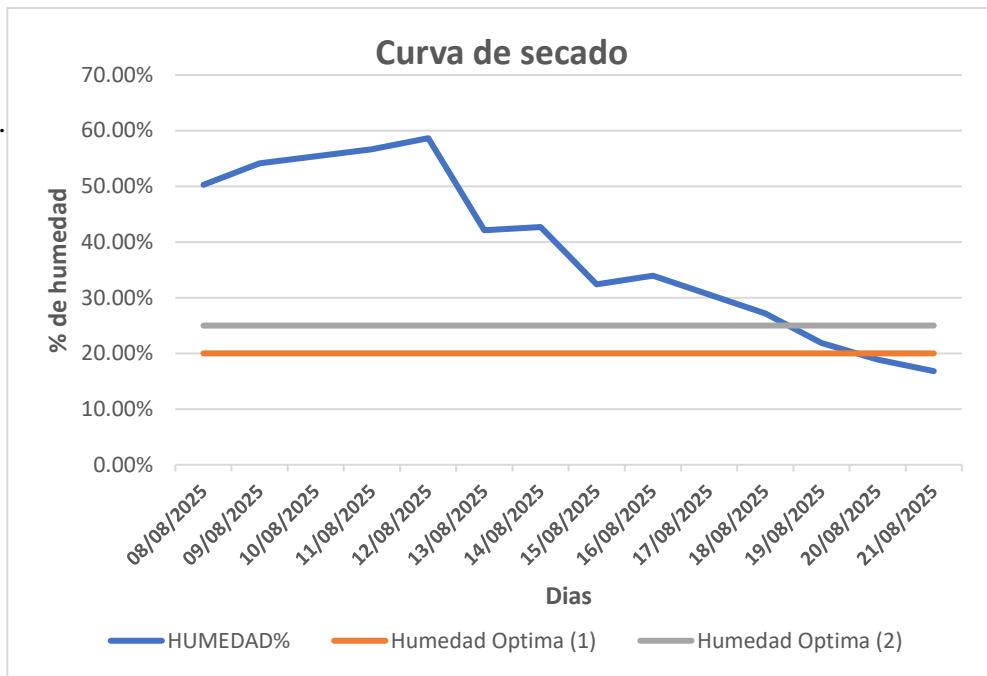
12.3 Condiciones previas: Proceso de secado del biosólido

Para garantizar un funcionamiento eficiente de la caldera de biomasa a nivel industrial, se realizó previamente un proceso de secado natural del biosólido, para lo cual se estableció un protocolo específico que permitiera el registro periódico de diferentes parámetros, y principalmente los valores de humedad. Este procedimiento fue fundamental para alcanzar la humedad óptima de la biomasa, condición necesaria para una combustión

adecuada. Sobre la base de los datos obtenidos, se construyó la curva de secado, herramienta clave para comprender la dinámica del proceso y asegurar la estabilidad y eficiencia térmica de la caldera durante su operación.

En la gráfica 3 se muestra la Curva de secado del biosólido. Se observan variaciones significativas en la pérdida de humedad a lo largo de los días. Es importante señalar que Inicialmente, el material se dispuso en capas de gran espesor, lo que generó una alta retención de humedad. Esta condición dificultó la evaporación eficiente del agua, especialmente en los primeros días del proceso, y se reflejó en una disminución poco significativa del contenido de humedad, e incluso un leve aumento en algunos casos. Este comportamiento puede atribuirse tanto a la baja exposición del material al aire como a posibles efectos de reabsorción de humedad superficial.

También, durante los primeros días se presentaron brisas de forma irregular, por lo que el material se cubrió con plástico durante la noche para evitar la dispersión del biosólido. Si bien esta medida protegió el material de la acción del viento, también pudo haber limitado la ventilación y promovido la acumulación de humedad por condensación, lo que habría afectado negativamente la eficiencia del secado durante las noches. Cabe mencionar que el proceso de secado se realizó del 8 al 21 de agosto del 2025



Gràfic 3. Comportamiento de la humedad del biosòlido – Secado en pati

A partir del quinto día, se realizó una reducción del espesor de las capas de biosòlido, lo que favoreció significativamente la pérdida de humedad. Con menor espesor, aumentó la superficie expuesta al ambiente, facilitando la transferencia de calor y la evaporación del agua. Este cambio en las condiciones físicas del material coincidió con un aumento y estabilización de la temperatura interna del biosòlido, alcanzando valores cercanos a los 165 °C. Es importante destacar que esta temperatura corresponde a la alcanzada por el propio material, y no solo al ambiente circundante. Al aumentar la temperatura interna del biosòlido se acelera la evaporación. Esto explica la disminución rápida del contenido de humedad observada entre los días 5 y 9, donde se registraron descensos de más de 10 puntos porcentuales diarios.

Los días 10 al 12, el contenido de humedad se estabilizó en valores bajos (entre 16 y 22 %), lo cual indica que el material entró en la fase final del secado. En esta etapa, el agua remanente se encuentra estrechamente asociada a la estructura del biosòlido, lo que dificulta

su evaporación y hace que su eliminación sea considerablemente más lenta, requiriendo mayor tiempo o aporte de energía.

En síntesis, la curva de secado obtenida muestra un comportamiento típico de procesos de deshidratación natural: una fase inicial lenta debido al espesor y condiciones ambientales, seguida de una fase acelerada al mejorar las condiciones físicas del material, y finalmente una fase de estabilización. La experiencia sugiere que la reducción temprana del espesor de la capa y un control más eficiente del microclima (ventilación, protección selectiva) podrían mejorar significativamente la eficiencia del proceso en futuras aplicaciones.

Tabla 2. Prueba de secado natural en patio

Cantidad de biosólido (Kg)		Porcentaje de humedad	Pérdida de peso en el proceso de secado natural en patio (Kg)
Peso inicial	5,190	62%	490 Kg (representa el 10% de pérdida de peso)
Peso final	4,700	20%	

Cabe mencionar que el material al ser secado en patio pierde el 10% de peso.

Una vez que se obtuvo el valor de humedad requerido para la prueba en la caldera, el material seco fue trasladado el día 21 de agosto a las instalaciones de E-Chamorro Industrial. El biosólido se almacenó bajo techo.

12.4 Pruebas experimentales en caldera industrial

La prueba a nivel industrial se realizó en la caldera de biomasa de la Empresa E-Chamorro, con el objetivo de evaluar el comportamiento de la caldera alimentada con biosólido, analizando la producción de vapor (kg/h) y la presión (bar) durante un intervalo de 2.5 horas. En la siguiente tabla se presentan las condiciones generales que se tomaron en cuenta para llevar a cabo la prueba:

Tabla 3. Condiciones de operación de la prueba en caldera de biomasa

Informe:	Operación de caldera con biosólido
Fecha de la prueba	23 de agosto 2025
Horario:	8:30 am-11:30 am
Frecuencia de monitoreo:	Cada 30 min
Potencia de la caldera	450 BHP (Boiler Horsepower)
Capacidad de la caldera	6,500 kg/h de vapor (La prueba se realizó al 50% de la capacidad)
Presión de trabajo	9.5 bar - 10.2 bar
% de humedad promedio del biosólido	20.39%
Cantidad de biosólido para prueba	4,700 kg de biosólido
Cantidad de vapor generado durante la prueba de 2.5 horas	8,200 Kg/h
Poder calorífico promedio	5,290 Btu/lb
Ubicación	Industrial E-Chamorro

La prueba de uso de biosólido como combustible en la operación de la caldera se llevó a cabo el sábado 23 de agosto, en condiciones en las que la planta operaba al 50 % de su capacidad. Inicialmente, la caldera fue encendida utilizando cascarilla de café como combustible, y tras alcanzar una operación estable, se procedió a la incorporación gradual del biosólido como parte del proceso de evaluación. Durante la prueba, la demanda de vapor del área de producción fue de 3,500 kg/h, valor que debía mantenerse constante para garantizar la

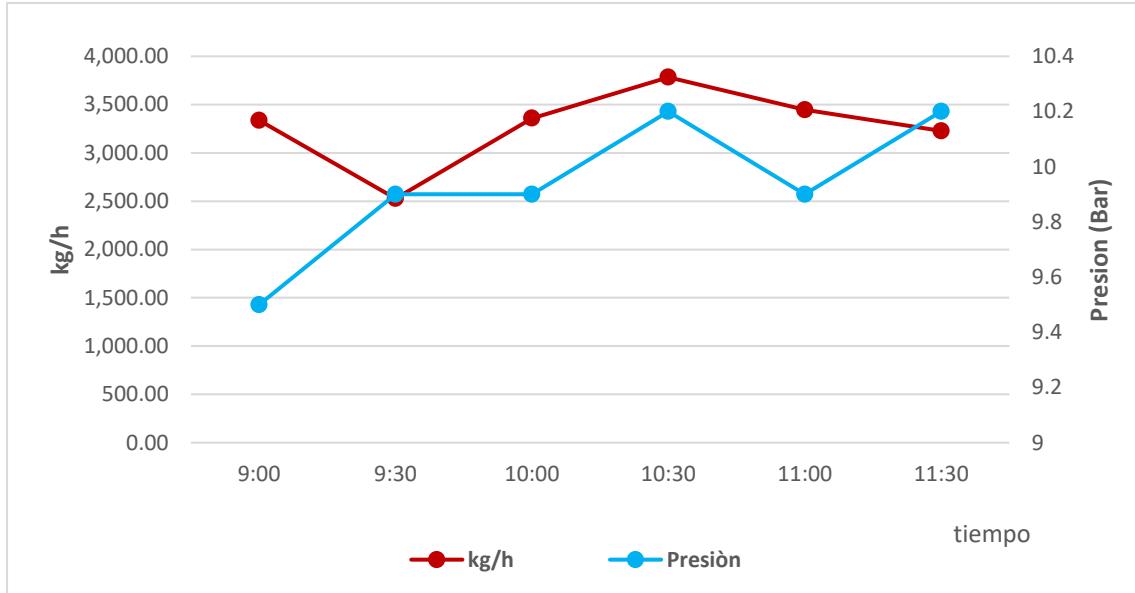
continuidad del proceso y evitar interrupciones operativas (según las pruebas se logró la generación de 8,200 Kg de vapor en un periodo de 2.5 horas). La cantidad de material de biosólido utilizado para la prueba fue de 4,700 kg, con una humedad promedio del 20%, el tiempo de duración fue de 2.5 horas. Con estos valores se determinó que 1.74 Kg de vapor requieren 1 Kg de combustible, el contenido de humedad del biosólido fue del 20%, hay calderas que operan con eficiencias de 1.5 a 2 Kg de vapor por Kg de combustible, es decir que el valor encontrado se encuentra dentro de rango.

12.5 Análisis técnico de resultados

En la gráfica 5 se muestra el comportamiento. La producción promedio de vapor fue de 3,280 kg/h a una presión promedio de 9.93 bar, según el registro automático. El valor más bajo registrado fue de 2,528 kg/h de vapor a las 9:30 am. La cantidad de vapor está en función de la demanda del proceso productivo.

El valor más bajo observado tomado del panel de control fue 2,323 kg/h una presión de 6.6 bar a las 11:40 am. A pesar de una tendencia estable después de las 10:00, la caída a las 11:40 indica una pérdida significativa de capacidad de generación de vapor.

Esta reducción repentina de presión puede afectar la entrega de vapor al proceso, y sugiere un desbalance térmico en la caldera.



Gràfico 4. Comportamiento de la producción de vapor Vrs presión

La causa probable de caída de presión es mayor humedad de la biomasa, es importante señalar que el biosólido transportado de matadero San Martin hacia E-Chamorro (jueves 21 a las 2:30 pm), el material tenía una humedad entre 21.90 y 18.88% (con un valor promedio 20.39% que se encuentra apropiadamente dentro del rango óptimo del 20% al 35% de humedad), el cual fue almacenado bajo techo en un montículo. Se considera que la parte final del montículo, alimentada cerca de las 11:40 am, tenía mayor humedad real, lo que redujo su poder calorífico y la eficiencia de combustión, cabe mencionar que este comportamiento se presentó en la etapa final de la alimentación del biosólido, es decir la cantidad que estaba en la parte inferior del montículo. Las causas posibles del aumento de humedad en la base del montículo de biosólido son:

- Por su propio peso se produce compactación del material, se reduce la ventilación interna y atrapa humedad.

- Falta de volteo o aireación, lo cual crea zonas húmedas no visibles superficialmente.
- Condensación nocturna, que humedece zonas externas o frías del montículo de biomasa.

12.6 Análisis económico del proyecto

Con la información recopilada se ha calculado la producción de vapor que se puede generar mensualmente, considerando la información de la tabla 1 y el indicador 1.74 Kg de vapor requieren 1 Kg de combustible, según las pruebas realizadas en la caldera a nivel industrial, los valores mensuales se muestran a continuación:

Tabla 4. Producción de vapor por hora

Mes	Toneladas de biosólido /mes (al 62% de humedad)	Toneladas de biosólido /mes (al 20% de humedad)	kilogramos de biosólido /mes (al 20% de humedad)	Producción de vapor al mes (kg de vapor/mes)	Producción de vapor (kg de vapor/h)	Observación
mar-24	1,857.58	1672	1671826	2908977	8080	Operaran los dos biodigestores
abr-24	1,802.32	1784	1784297	3104676.432	8624	
may-24	2,227.23	2005	2004509	3487845	9688	
jun-24	1,416.38	1402	1402220	2439863	6777	
Jul-24	1,438.53	1295	1294675	2252735	6258	
ago-24	2,463.18	2439	2438552	4243081	11786	
sep-24	1,148.39	1034	1033553	1798382	4996	Opera un solo biodigestor (el otro estaba en mantenimiento)
oct-24	801.78	794	793766	1381153	3837	
nov-24	1,089.96	981	980964	1706877	4741	
dic-24	878.10	869	869323	1512622	4202	
ene-25	832.45	749	749203	1303614	3621	
feb-25	819.60	811	811404	1411843	3922	
Promedio	1,397.96	1,319.52	1,319,524.32	2,295,972.32	6,377.70	

El tamaño de la caldera estará en función de la cantidad de vapor que necesita el proceso productivo, sin embargo, con los valores determinados en la tabla anterior se puede diseñar una caldera con una producción de 6,500 kg de vapor/ hora, tomando en cuenta el valor promedio de 6,377 kg de vapor/h. Para este tamaño de generación de vapor se puede sugerir una caldera con una potencia de 460 BHP.

Nota: Es crucial seleccionar un fabricante con experiencia en el diseño y fabricación de calderas industriales de biomasa, que pueda ofrecer soluciones personalizadas según las necesidades específicas del proceso. Dado que la empresa cuenta con generación de biogás, se debe de valorar que la caldera que se diseñe sea dual (que opere con biomasa y/o biogás).

12.7 Estimación de inversión

A continuación, se presenta una estimación de costos del proyecto llave en mano:

Concepto	Estimación ajustada (U\$)	Comentario
Equipamiento principal (Caldera de 300 BHP dual (Biomasa del biosólido y biogás))	880,000 -1,150,000	Quemador especial para biomasa y biogás + control automático (Permite usar biogás cuando hay baja biomasa disponible, mejora eficiencia global y reduce consumo de biosólido.)
Secador industrial para flujo de biomasa (biosólido)	270,000 – 470,000	Para secar de (5 – 9 t/h de biosólido húmedo por hora. Se tomará energía residual de la caldera
Sistema de manejo de biosólido (tolva, transportadores, cenizas)	200,000 – 340,000	Debe de manejar hasta 9 t/h para picos de operación
Controles, instrumentación, emisiones (nivel europeo)	200,000 – 340,000	Filtro de partículas, control NOx, CO, y gestión de cenizas
Obras civiles (cimentación, sala, chimenea)	135,000 – 270,000	Caldera de 460 BHP requiere obra sólida

Concepto	Estimación ajustada (U\$)	Comentario
Sistema de alimentación de agua y tratamiento	54,000 – 108,000	Agua de caldera, bombas, tanques y sistemas de tratamiento de aguas de caldera
Transporte, aranceles, logística interna (200 km) (puerto Corinto a la empresa)	95,000 – 160,000	Incluye grúas y transporte pesado y maniobras de descarga
Instalación y puesta en marcha	108,000 – 200,000	Mano de obra local + supervisión técnica internacional

El proyecto llave es mano se estima en el rango de 1,942,000 a 3,038,000 dólares.

Para el cálculo de las estimaciones de la inversión se tomará el valor promedio de 2,490,000 dólares.

Para determinar el ahorro económico por la implementación del proyecto se ha tomado en cuenta que el proyecto sustituye el consumo de diésel, las siguientes consideraciones:

- Costo del litro de diésel 1.18 U\$/litro.
- Se estima un consumo de diésel de 555 litros /hora (esto para producir los 6,500 kg de vapor por hora).
- Consumo anual de diésel es de 2,430,900 litros /año de diésel .
- Se tiene un costo anual de diésel de 2,868,462 U\$/año.
- El periodo de recuperación simple refleja que el proyecto se recupera en 1 año aproximadamente.

Nota: Para el cálculo de la rentabilidad es importante hacer un modelo financiero de flujo de efectivo donde se incluya el costo de la inversión, los costos operativos (personal que operara los equipos, productos químicos para tratamiento de agua, manteniendo de los equipos, permisos de operación como licencia de operación de caldera y licencia de operadores, logística de manipulación o traslado del biosólida entre otros. Poder obtener la TIR y el VPN del proyecto para validar la rentabilidad con una proyección a unos 15 a 20 años de vida útil o lo que le indique el proveedor de la caldera y el secador.

XIII. Discusiones

Los resultados obtenidos confirman la tendencia ampliamente documentada en la literatura: la humedad es el factor crítico que determina el potencial energético de los biosólidos y su viabilidad como combustible (Zhang et al., 2020; Kumar et al., 2015). En coincidencia con estudios previos, el biosólido en estado natural (>50 % de humedad) mostró un poder calorífico insuficiente (<3,000 Btu/lb), tal como lo señalan Li et al. (2019) y Appels et al. (2008). Sin embargo, al alcanzar niveles óptimos de humedad cercanos al 20 %, se registraron poderes caloríficos superiores a 5,600 Btu/lb, alineados con los valores reportados por Bhattacharya et al. (2012) y considerados adecuados para combustión en calderas de biomasa (McKendry, 2002).

El comportamiento observado durante la prueba industrial refuerza la evidencia de que el contenido de cenizas y la variabilidad de humedad interna del material pueden afectar la estabilidad térmica y la presión operativa de la caldera. Tal como indican González-García et al. (2018), valores elevados de cenizas pueden favorecer la formación de escorias y reducir la transferencia de calor, elementos que coinciden con la caída de presión detectada al final de la prueba. La rehumectación localizada del material almacenado, atribuida a compactación y condensación, concuerda con los procesos descritos por Kumar et al. (2015) en estudios sobre secado natural en ambientes tropicales.

En términos de desempeño energético, la relación obtenida (1 kg de biosólido seco → 1.74 kg de vapor) se encuentra dentro de los rangos esperados para combustibles de biomasa con humedad moderada, según lo señalado por Demirbas (2004). Esto evidencia que, bajo condiciones controladas, el biosólido de Industrial Comercial San Martín puede reemplazar

parcialmente combustibles fósiles como el diésel, lo que coincide con estudios sobre su potencial dentro de modelos de economía circular (Khan et al., 2021; Li et al., 2019). Finalmente, la viabilidad económica obtenida se alinea con investigaciones internacionales que muestran que la valorización energética reduce costos operativos y aporta beneficios ambientales significativos.

13.1 Conclusiones

Los resultados de la presente investigación permiten concluir que el biosólido generado en el biodigestor de Industrial Comercial San Martín posee las características necesarias para ser utilizado como combustible alternativo en calderas de biomasa, siempre que se realice un acondicionamiento adecuado mediante secado natural. La caracterización energética demostró que la humedad es la variable más determinante en el comportamiento térmico del biosólido, ya que en su estado natural (>50 % de humedad) presenta un poder calorífico insuficiente para garantizar una combustión estable. No obstante, al reducir la humedad a niveles cercanos al 20 %, el biosólido alcanza valores superiores a 5,600 Btu/lb, lo cual lo convierte en un combustible viable desde la perspectiva técnica.

La prueba experimental realizada en la caldera industrial de E-Chamorro confirmó que el biosólido acondicionado puede generar vapor de manera estable dentro de parámetros operativos adecuados, alcanzando una relación de 1.74 kg de vapor por kilogramo de combustible, valor que se encuentra dentro del rango esperado para biomasa con niveles moderados de humedad. Aunque se presentó una disminución puntual en la presión y producción de vapor hacia el final de la prueba, esta situación estuvo asociada a la

variabilidad de humedad en la base del montículo de biomasa almacenada, lo que evidencia la necesidad de mejorar los controles de almacenamiento, volteo y ventilación del material previo a su combustión.

Desde el punto de vista económico, el proyecto muestra una alta viabilidad, ya que la sustitución del diésel por biosólido implica un ahorro significativo para la empresa, con un periodo de recuperación simple cercano a un año. La implementación de una caldera dual (biomasa–biogás) y un sistema de secado industrial permitiría aumentar la eficiencia del proceso, asegurar la estabilidad del suministro de vapor y reducir aún más la dependencia de combustibles fósiles.

Finalmente, la utilización del biosólido como combustible contribuye directamente al fortalecimiento del modelo de economía circular de la empresa, ya que transforma un residuo de bajo valor en un recurso energético útil, reduciendo la huella de carbono, disminuyendo el volumen de desechos y promoviendo un sistema productivo más sostenible. La investigación establece bases técnicas sólidas para el desarrollo de proyectos de cogeneración a partir de residuos orgánicos en la industria cárnica nicaragüense y sugiere la necesidad de estudios complementarios a largo plazo para evaluar variables ambientales, impactos operativos continuos y el comportamiento del biosólido en condiciones extendidas de combustión.

13.2 Recomendaciones

1. Fortalecer y estandarizar el proceso de secado del biosólido.
2. Mejorar las condiciones de almacenamiento del biosólido seco.
3. Realizar pruebas de operación prolongada en la caldera.
4. Implementar un sistema de control de calidad del biosólido destinado a combustión.
5. Adquirir una caldera dual (biomasa–biogás).
6. Formalizar un plan financiero integral del proyecto.
7. Fortalecer la capacitación del personal técnico y operativo.
8. Continuar impulsando el enfoque de economía circular en la empresa.
9. Promover estudios complementarios sobre impacto ambiental y comportamiento de cenizas.

Referencias

- Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge.
- Bhattacharya, S. C., Sett, S., & Shrestha, R. M. (2012). Biomass drying technologies and energy efficiency improvements.
- De Sena, R., et al. (2008). Evaluación energética de biosólidos agroindustriales deshidratados.
- Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels.
- EPA. (1999). Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge (40 CFR Part 503).
- González-García, S., et al. (2018). Thermal behavior and ash characterization of biosolids for energy recovery.
- Khan, M. T., et al. (2021). Energy valorization of agro-industrial biosolids: environmental and economic implications.
- Kumar, A., et al. (2015). Natural drying kinetics of biosolids under tropical conditions.
- Li, X., et al. (2019). Energy potential and combustion performance of anaerobic digestate-derived biosolids.
- Liu, H., et al. (2018). Combustion behavior of biomass residues under various moisture conditions.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Macé, S., & Astals, S. (2014). A critical review of anaerobic digestion.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass: conversion technologies.
- Nordin, A., et al. (2020). Combustion of biosolids in biomass boilers: performance and ash implications.
- Pulgarín, J., et al. (2022). Evaluación térmica de residuos agroindustriales en calderas de biomasa en climas tropicales.
- Ruiz Terán, M. (2020). Comportamiento de cenizas de digestatos en calderas industriales.
- UNEP. (2017). Guidelines on the safe use of wastewater, excreta and greywater.
- Wang, Y., et al. (2019). Thermochemical conversion of digestate: pyrolysis and gasification performance.

Zhang, P., et al. (2019). Physicochemical characterization of biosolids for energy recovery.

Zhang, P., et al. (2020). Energy valorization pathways for wastewater biosolids.

Anexos

Anexo 10.1 Resultados por nivel de humedad del biosólidos

Fecha	Humedad (%)	Q (Btu/lb)	Ceniza (%)
24/6/25	12.22	6185.92	-
24/6/25	12.44	6042.12	-
24/6/25	14.50	5978.27	-
24/6/25	16.71	5910.62	-
23/6/25	17.90	5505.28	14.99
23/6/25	18.90	5579.63	14.25
22/6/25	19.91	4775.71	-
22/6/25	23.07	4938.97	-
23/6/25	25.57	5138.60	13.07
22/6/25	27.44	4885.33	-
20/6/25	29.53	4658.19	13.32
23/6/25	29.88	4713.11	12.20
22/6/25	31.55	4645.54	-
20/6/25	31.78	4975.25	14.67
20/6/25	31.87	5037.29	16.03
20/6/25	34.40	4561.18	14.15
24/6/25	35.61	4229.97	-
22/6/25	43.67	3780.30	-
23/6/25	45.40	3658.48	10.37
20/6/25	47.67	3709.36	11.43
22/6/25	49.04	3618.82	-
20/6/25	56.83	2922.94	9.20

Anexo 10.2 Protocolo para la elaboración de curva de secado solar de biosólido

Nota: Para la prueba en la caldera se requiera la cantidad de dos camiones (o bien 10 toneladas de biosólido húmedo).

Objetivo: Determinar el comportamiento del secado al sol del biosólido hasta alcanzar una humedad en el rango de 20% a 25% de humedad, mediante la elaboración de una curva de secado bajo condiciones ambientales locales.

1. Preparación del área de secado

Ubicación: Patio o zona abierta con buena exposición solar durante todo el día.

Superficie: Cemento de ser preferible, o bien en su caso carpeta de plástico gruesa, hay que asegurar que quede nivelado en el terreno para lograr un secado homogéneo.

Drenaje: Verificar que no se formen charcos

2. Caracterización inicial del biosólido

Antes de iniciar el secado, se deberá realizar un análisis de humedad inicial al biosólido, tomar la muestra a la salida del proceso de prensado (Es decir a la salida del biodigestor).

3. Procedimiento de secado y muestreo

Duración estimada: Hasta alcanzar el rango de humedad deseada (puede ser aproximadamente 8 días).

Realizar mediciones de humedad cada 3 horas en el primer y segundo día del secado.

Posteriormente, cada 6 horas, hasta alcanzar la meta.

Procedimiento diario:

Extender el biosólido en el área asignada con una capa uniforme de 15 a 20 centímetros de espesor.

Realizar volteo manual con pala cada 3 veces al día (8:00 a.m., 12 mediodía y 4:00p.m) para acelerar el secado y evitar formación de costras superficiales. El volteo también podrá ser mecanizado en caso de que la empresa tengo la maquina necesaria para realizarlo.

Recolectar muestra para la medición de humedad (la muestra tiene que estar lo más homogénea posible y determinar su porcentaje de humedad.

4. Registro de datos

Crear una tabla de datos con los siguientes campos:

Día	Hora	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Humedad (%)	Temperatura ambiente °C	Observación

5. Condiciones críticas a observar

Evitar el secado durante las lluvias o alta humedad (superior al 80%).

Documentar condiciones climáticas en cada toma de muestra.

Finalización.

El secado se considerará completo cuando el biosólido alcance una humedad en el rango de 20% a 25%.

Elaborar una gráfica de curva de secado (Humedad VS. tiempo en horas).

La gráfica puede ser similar a la siguiente:



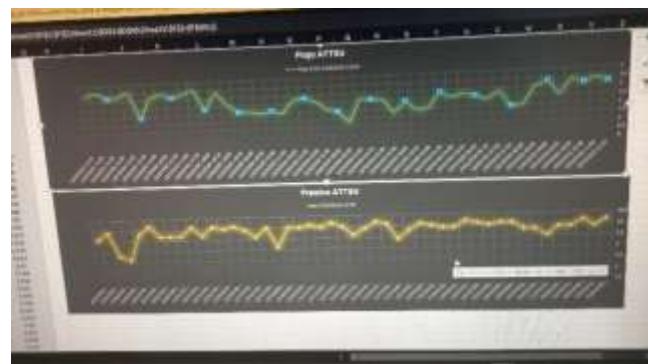
Anexo 10.3 Registro de control de humedad del biosólido

FECHA	DÍA	HORA	PESO HÚMEDO (G)	PESO SECO(G)	HUMEDAD%	TEMPERATURA BIÓSOLIDO (GRADO CELSIUS)
08/08/2025	VIERNES	8:00	5. (GR)	49.1	50.30%	148°C
09/08/2025	SÁBADO	8:00	5.(GR)	45.88	54.12%	150°C
11/08/2025	LUNES	8:00	5GR	43.31	56.69%	165°C
12/08/2025	MARTES	8:00	5GR	41.35	58.65%	165°C
13/08/2025	MIÉRCOLES	8:00	5GR	57.87	42.13%	165°C
14/08/2025	JUEVES	8:00	5GR	57.33	42.67%	158°C
15/08/2025	VIERNES	8:00	5GR	67.61	32.39%	164°C
16/08/2025	SÁBADO	8:00	5GR	66.12	33.98%	165°C
18/08/2025 0:00	LUNES	8:00	5GR	72.86	27.14%	165°C
19/08/2025	MARTES	8:00	5GR	78.10	21.90%	165°C
20/08/2025	MIÉRCOLES	8:00	5GR	81.12	18.88%	165°C
21/08/2025	JUEVES	8:00	5GR	83.19	16.81%	165°C

Fuente: Datos proporcionados por Industrial San Martín.

Anexo 10.4 Registro de la prueba de uso de biosólido como combustible alterno en una caldera.

Hr	kg/h	Presión (bar)
09:00	3,337.00	9.5
09:30	2,528.00	9.9
10:00	3,359.00	9.9
10:30	3,783.00	10.2
11:00	3,446.00	9.9
11:30	3,227.00	10.2

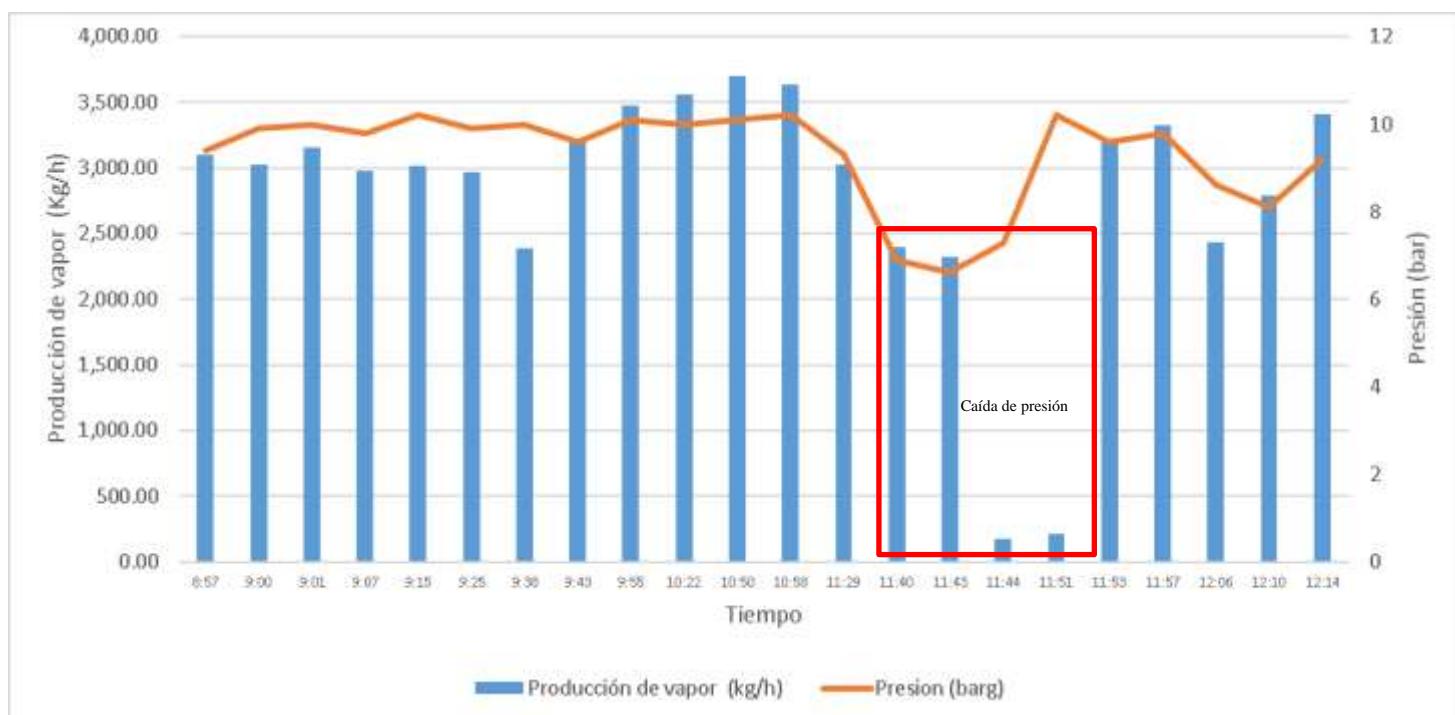


Fuente: Valores proporcionado por el área de caldera

2) Registro tomados del panel de control del área de caldera

Fuente: Datos tomados del panel de control E-Chamorro

hr	Rate (kg/h)	Presión (barg)	Thumos °C	Tagua de aliment °C	Oxigeno	Carga
08:23	208,082,930.00	8.6	188.4	64	20.90%	100%
08:34		10.3	190.9	62.8	20.90%	90%
08:43		10.1	195.7	61.6	17.90%	90%
08:57	3,098.40	9.4	193.3	67.1	20.90%	100%
09:00	3,026.70	9.9	198.2	66.5	20.90%	100%
09:01	3,155.30	10.0	193.9	65.9	18.60%	100%
09:07	2,976.20	9.8		67.5		100%
09:15	3,014.80	10.2	193.9	65.9	18.60%	90%
09:25	2,912.20	9.9	196.3	65.2	20.90%	100%
09:38	2,388.60	10.0	200.6	64.0	12.50%	100%
09:43	3,213.80	9.6	196.3	64.0	20.90%	100%
09:55	3,473.70	10.1	200.0	64.0	20.90%	100%
10:22	3,556.80	10.0	196.3	61.6	20.90%	100%
10:50	3,695.90	10.1	201.8	62.8	20.90%	100%
10:58	3,635.70	10.2	197.5	62.2	20.30%	90%
11:29	3,028.80	9.3	195.1	60.4	20.90%	100%
11:40	2,398.50	6.9	180.5	59.8	20.90%	100%
11:43	2,323.30	6.6	182.9	61.6	20.90%	100%
11:44	170.30	7.3	185.4	61	20.90%	100%
11:51	211.20	10.2	193.9	59.1	20.00%	100%
11:53	3,194.60	9.6	195.1	59.1	18.00%	100%
11:57	3,326.30	9.8	199.4	58.5	20.00%	100%
12:06	2,438.30	8.6	193.9	65.9	20.80%	100%
12:10	2,794.30	8.1	187.8	61	20.30%	100%
12:14	3,411.00	9.2	196.3	60.4	20.40%	100%



Anexo 10.5 Galería de fotografías

Fotografía 1. Descarga del biosólido en el área de secado (08/08/2025)



Fotografía 2. Tendido de biosólido para el secado



Fotografía 3. Control de temperatura y humedad del biosòlido



Fotografía 4. Recolección de biosólidos para su traslado a planta E-Chamorro(20/08/2025)



Fotografía 5. Traslado del biosólido a la tolva de recepción (23/08/2025)



Fotografía 6. combustión del biosólido en la caldera

Anexo 10.6 Minutas de cantidad de biosólido para la prueba de secado en patio

