

Thermal Pretreatment of Sugarcane Straw: Physicochemical Properties, Combustion Behaviour and Emission Prediction

Estela Assureira¹; Marco Assureira²

¹Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, eassure@pucp.edu.pe

²Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, assureira.ma@pucp.edu.pe

Abstract- *Sugarcane straw is an agro-industrial residue with potential for use as a solid biofuel in thermochemical processes. However, its direct use presents limitations due to its high moisture content, low bulk density, fibrous structure, and high levels of alkalis, sulfur, and chlorine, which promote slagging, fouling, corrosion, and pollutant emissions. This study evaluates a combined pretreatment process—cutting, washing, and torrefaction—aimed at improving its physicochemical properties. The sugarcane straw was chopped (5–20 mm) and washed with distilled water under eight different conditions, varying temperature (20 °C and 80 °C), time (10 and 20 minutes), and stirring type, while maintaining a solid concentration of 3.33%. The optimal condition (80 °C, 20 minutes, continuous stirring) allowed for the highest removal of ash, alkalis, chlorine, and sulfur. The washed residue was then torrefied at 250 °C for 20 minutes in a controlled oxidizing atmosphere. The results show significant improvements: the higher heating value reached 22 MJ·kg⁻¹ (a 26.65% increase), ash content was reduced by 18.7%, and the resulting chlorine and sulfur contents were 0.01% and 0.12%, respectively. Additionally, 62.7% of Na₂O and 47.6% of K₂O were removed, reducing the risk of deposit formation. Energy density increased from 0.29 to 5.05 GJ·m⁻³, bulk density increased thirteenfold, and both hydrophobicity and grindability were enhanced. Although total emissions increased slightly, more than 95% corresponded to CO₂, which is potentially recyclable via photosynthesis. The proposed treatment represents an effective strategy to enhance the energy value of this residue.*

Keywords – *Sugarcane straw, Washing, Torrefaction, Slagging, Fouling.*

Hojas de Caña de Azúcar Tratadas Térmicamente: Propiedades Fisicoquímicas, Comportamiento en Combustión y Predicción de Emisiones

Estela Assureira¹; Marco Assureira²

¹Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, eassure@pucp.edu.pe

²Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, assureira.ma@pucp.edu.pe

Resumen—La hoja de caña de azúcar es un residuo agroindustrial con potencial para uso como biocombustible sólido en procesos termoquímicos. No obstante, su uso directo presenta limitaciones debido a su humedad, baja densidad aparente, estructura fibrosa y elevados contenidos de álcalis, azufre y cloro, que favorecen fenómenos de escorificación, ensuciamiento, corrosión y emisiones contaminantes. Este estudio evalúa un proceso combinado de pretratamiento —corte, lavado y torrefacción— orientado a mejorar sus propiedades fisicoquímicas. La hoja de caña fue fragmentada (5–20 mm) y lavada con agua destilada bajo ocho condiciones, variando la temperatura (20 °C y 80 °C), el tiempo (10 y 20 minutos) y el tipo de agitación, manteniendo una concentración de 3.33%. La condición óptima (80 °C, 20 minutos, agitación continua) permitió la mayor remoción de cenizas, álcalis, cloro y azufre. El residuo lavado fue torrefactado a 250 °C durante 20 minutos en atmósfera oxidante controlada. Los resultados muestran mejoras significativas: el poder calorífico alcanzó 22 MJ·kg⁻¹ (incremento del 26.65%), mientras que los contenidos de cenizas se redujeron en 18.7%, los porcentajes de cloro y azufre resultantes fueron de 0.01% y 0.12%, respectivamente. Se logró eliminar el 62.7% de Na₂O y el 47.6% de K₂O, reduciendo riesgos de incrustaciones. La densidad energética pasó de 0.29 a 5.05 GJ·m⁻³, la densidad aparente se incrementó trece veces y se mejoraron la hidrofobicidad y la triturabilidad. Aunque las emisiones totales aumentaron ligeramente, más del 95% corresponde a CO₂, potencialmente reciclable por fotosíntesis. El tratamiento propuesto representa una estrategia eficaz para valorizar energéticamente este residuo.

Palabras clave— Hojas de caña, Lavado, Torrefacción, Escorificación, Ensuciamiento.

I. INTRODUCCIÓN

La producción mundial de energía en el año 2023 fue de 620 EJ, 2% más que el año 2022, este crecimiento tuvo como consecuencia un aumento del 2.1% de las emisiones de gases de efecto invernadero las que alcanzaron los 40 Gt CO₂e [1]. Siguiendo la tendencia de años anteriores, el 81% de la producción mundial correspondió a los combustibles fósiles (26% al carbón, 32% al petróleo y 23% al gas natural) los que a su vez que generaron el 87% del total de emisiones de gases de efecto invernadero [1]. Este panorama demanda el urgente un cambio de la matriz energética.

La energía derivada de la biomasa, constituye una alternativa con múltiples beneficios como la reducción de las emisiones netas de CO₂ debido a su carácter carbono-neutro; la valorización de residuos agrícolas, forestales y urbanos mediante su aprovechamiento energético; la diversidad de tecnologías disponibles para su conversión energética, así como su potencial para dinamizar la economía rural y fomentar la generación de empleo sostenible.

Las fuentes de biomasa son diversas, al igual que los procesos para su transformación energética [2]. En particular, el uso de residuos agrícolas ofrece numerosas ventajas como: su permanente disponibilidad y su distribución relativamente uniforme en todas las regiones y su alta eficiencia procesos térmicos [3]. Sin embargo, para optimizar su aprovechamiento, es necesario modificar ciertas propiedades con el fin de reducir los problemas asociados al manejo, almacenamiento y conversión energética, tales como la formación de escorias, degradación, baja densidad energética, entre otros [4].

Con la finalidad de mejorar las propiedades de los residuos agrícolas y superar los inconvenientes señalados, para posibilitar su empleo como combustible se han desarrollado y aplicado diversos pretratamientos. De la revisión de la literatura [5] se concluye que se vienen realizando investigaciones en el desarrollo de procesos mecánicos y químicos a baja temperatura para mitigar algunas características negativas. Los procesos mecánicos consisten principalmente en la adición de aditivos para alterar la composición de la ceniza del residuo [5]. En lo relacionado a los procesos químicos, estos emplean medios líquidos para remover los elementos solubles presentes. El lavado con agua o con ácido son pretratamientos químicos que, según varias investigaciones, permiten disminuir los contenidos de Cl y metales alcalinos existentes en los residuos agrícolas [6]. Si bien el lavado con ácido destaca por los altos niveles de remoción de la mayoría de los metales alcalinos y alcalinotérreos de la biomasa [7], sin embargo, ocasiona daño a la estructura de las fibras [8], tiene un alto costo y es contaminante, razones por las que el lavado con agua es muchas veces el pretratamiento preferido para eliminar el K, Cl y S de la biomasa [7]. Cabe señalar que, de acuerdo a la revisión de la literatura, la efectividad de este proceso está influenciada por diversos factores, entre los que destacan la temperatura del agua, el tiempo de remojo, la granulometría del residuo, y la relación entre la masa del residuo y el volumen del agua empleada [5]. Por lo tanto, el proceso debe ser diseñado en fusión a las características específicas del residuo en estudio.

Adicionalmente, con el objetivo de incrementar el contenido energético del residuo, se aplican procesos térmicos como la torrefacción, la cual se lleva a cabo en un reactor operando a temperaturas entre 200 y 300°C bajo condiciones de atmósfera inerte o con presencia limitada de oxígeno [9]. La torrefacción reduce significativamente el contenido de humedad y le confiere propiedades hidrofóbicas, lo que contribuye a evitar su descomposición

durante su almacenamiento. También, incrementa el contenido de carbono fijo, los ratios de C/H y de C/O y el poder calorífico del residuo haciendo que el producto resultante sea semejante a un carbón mejorando con ello su rendimiento en los procesos de combustión. Cabe señalar que la efectividad del proceso dependerá principalmente de las condiciones de la torrefacción (temperatura y tiempo) y de la composición del residuo a tratar [10].

La producción mundial de productos agrícolas observa un sostenido crecimiento y con ello la generación de residuos. En el año 2022 se produjeron 9.6 billones de TM de productos, ubicándose la caña de azúcar en el primer lugar el 20% [11]. En el Perú la producción reportada [12] indica que la caña de azúcar también fue el principal cultivo con el $12.6 \cdot 10^6$ TM lo que representa el 33.5% de la producción nacional [12].

Durante la cosecha de la caña de azúcar como se señala en [13] se generan gran cantidad de residuos, por cada tonelada de caña se generan entre 0.2 a 0.3 TM de hojas (SCS) las cuales son dejadas en los campos de cultivo por sus limitadas aplicaciones. A pesar que las SCS tienen un alto potencial para uso energético (HHV entre 15 y 17 MJ.kg⁻¹), su aprovechamiento en procesos termoquímicos es limitado debido a los problemas que presentan característicos de las biomásas herbáceas [4].

En este estudio se investigó los efectos de la combinación de los pretratamientos de lavado con agua y torrefacción sobre las hojas de caña de azúcar con la finalidad de mejorar sus propiedades físico-químicas para su uso como combustible en procesos termoquímicos. Las hojas de caña antes y luego de los pretratamientos aplicados fueron caracterizadas por las técnicas de análisis inmediato, análisis elemental, poder calorífico, y análisis de cenizas, según normas ASTM. A partir de los resultados obtenidos, se evaluaron las variaciones en los contenidos de ceniza, cloro (Cl), azufre (S), alcalis; así como en el carbono fijo y poder calorífico las relaciones molares O/C y H/C. Con base en estos parámetros se realizó la predicción del comportamiento de combustión de las muestras, la estimación de emisiones a generar, y la propensión a la escorificación y al ensuciamiento mediante el cálculo de índices específicos y el uso de diagramas ternarios.

II. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1. Recolección y preparación de las muestras

En la presente investigación se ha trabajado con hojas de caña de azúcar, denominada de aquí en adelante como SCS, residuo proveniente de las labores de cosecha de los campos de cultivo peruanos ubicados en el departamento de Piura, provincia de Sullana.

Las SCS fueron cortadas a una longitud de 0.5 a 2 cm, utilizando una guillotina de accionamiento manual. Seguidamente, se procedió a la obtención de una muestra representativa mediante la técnica de cuarteo, la muestra luego fue secada al sol, molida y tamizada hasta una granulometría de partícula menor a 246 micras. Las muestras fueron colocadas en bolsas tipo Ziploc, selladas y codificadas para su envío al laboratorio donde se realizó su

caracterización energética mediante análisis inmediato, análisis elemental, análisis de cenizas y, determinación del poder calorífico según normas ASTM. Adicionalmente, se calcularon diversos índices para predecir el comportamiento del residuo durante la combustión; su propensión a la deposición de cenizas y corrosión, así como la estimación de posibles emisiones generadas.

2.2. Lavado de las hojas de caña

Con la finalidad de reducir los contenidos de ceniza, alcalis, S y Cl del residuo, se diseñó y aplicó un proceso de lavado, el cual consistió en remojar 100 g de hojas cortadas en 3 litros de agua destilada (concentración de 3.33 %). Se evaluaron ocho condiciones de lavado estableciéndose como variables la temperatura del agua (20°C, 80°C); el tiempo de remojo del residuo (10 minutos, 20 minutos) y, la presencia o ausencia de agitación del medio.

La efectividad en la reducción de cenizas del residuo y elementos perjudiciales señalados fue evaluada mediante la medición de la conductividad eléctrica del agua residual, utilizando un conductímetro HANNA HI-99301. Esta técnica, aunque indirecta, permite estimar la concentración de sólidos disueltos en el agua de lavado. Cada ensayo se replicó tres veces bajo las mismas condiciones, y se utilizó el valor promedio de las mediciones como resultado final.

El proceso de lavado más efectivo fue el realizado a 80°C, 20 minutos y agitación continua ya que la lechada resultante presentó el mayor valor de conductividad eléctrica. Las muestras tratadas bajo estas condiciones fueron posteriormente caracterizadas mediante los mismos procedimientos aplicados al residuo sin tratamiento.

2.3. Torrefacción del residuo

Luego del lavado de las hojas de caña de azúcar, se secaron en un horno eléctrico 105°C durante 4 horas. El siguiente paso del pretratamiento fue la torrefacción, proceso que se llevó a cabo en un reactor cilíndrico horizontal rotatorio, calentado mediante una resistencia eléctrica, operando a presión atmosférica y en una atmósfera oxidante con limitada presencia de oxígeno. La velocidad de calentamiento empleada para alcanzar la temperatura de torrefacción fue de 18°C/minuto, estableciéndose una temperatura final de 250°C, mantenida durante 20 minutos. Finalizado el proceso, las hojas torrefactadas se dejaron enfriar dentro del reactor 15 minutos para evitar su autocombustión, y posteriormente se procedió a su extracción y caracterización siguiendo los mismos procedimientos aplicados al residuo sin tratamiento. El proceso de torrefacción repitió a una temperatura de 270°C durante 20 minutos, empleando la velocidad de calentamiento 20°C/minuto.

2.4. Análisis próximo

Este análisis se aplicó para establecer los contenidos de humedad (M), cenizas, materia volátil (MV) y carbono fijo (CF) en las muestras, expresando los resultados en porcentaje en peso. La determinación de estas propiedades se realizó de acuerdo a las normas ASTM D3173, ASTM D3174, ASTM D3175 y ASTM D3172, empleándose un horno de mufla

isotérmico Fisher Scientific 650-58, un horno HOSKINS FA120, y un horno GRIEVE LR271, para la hallar los contenidos de ceniza, materia volátil y humedad de las muestras respectivamente evaluadas. El carbono fijo se calculó por diferencia haciendo uso de (1).

$$CF = 100 - M - MV - \text{Ceniza} \quad (1)$$

2.5. Análisis elemental

Para determinar los contenidos de carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S) y nitrógeno (N), en las muestras aplicaron los métodos normalizados ASTM D3178, ASTM D3177 y ASTM D3179 respectivamente. El porcentaje de oxígeno (O) se calculó sustrayendo de 100 % los porcentajes de C, H, S, N y cenizas, como se indica en (2) donde todos los componentes están expresados en porcentaje en peso medido en base seca.

$$O = 100 - C - H - N - S - \text{Ceniza} \quad (2)$$

Los contenidos de C y H se obtuvieron empleando un horno Thermo Scientific STF55433C Lindberg/Blue M; para la determinación del contenido de N se utilizó una unidad de digestión compuesta por un frasco Kjeldahl con mechero Fisher y una unidad de destilación; y para hallar el S y cloro (Cl) presentes en las muestras se empleó una bomba calorimétrica isotérmica Parr 1341 siguiendo, para el caso del cloro, lo establecido por la norma ASTM D2361.

2.6. Poder calorífico

Se determinó el valor del poder calorífico superior de las muestras analizadas con la finalidad de establecer su contenido energético conforme la norma ASTM D5865, empleando una bomba calorimétrica isotérmica Parr 1341. Los resultados obtenidos se presentan en MJ.kg⁻¹.

2.7. Densidad aparente

La densidad aparente (BD) se refiere a la relación masa de la muestra por unidad de volumen total ocupado, incluyendo tanto los sólidos como los espacios vacíos entre las partículas. Su valor calcula según la norma ASTM E-873-82 y se expresa en la unidad de kg.m⁻³.

2.8. Índice o ratio de combustible (Fr)

Este índice es la relación entre el contenido de carbono fijo (CF) y el contenido de materia volátil (MV), vincula los aspectos de estabilidad y duración de la combustión y, la generación de llamas [14]. Se calcula aplicando (3)

$$Fr = CF/MV \quad (3)$$

2.9. Estado de oxidación del carbono (CHO)

Este índice califica el estado de oxidación del carbono en las muestras. Su valor está dentro del rango comprendido entre -4 y 4, expresando un mayor contenido de H (lado inferior) o un alto contenido de O (extremo superior) respectivamente. calculado haciendo uso de (4) [15].

$$CHO = (2O - H) / C \quad (4)$$

2.10. Índice de oxidación activa (IOA)

El riesgo de corrosión a altas temperaturas en las calderas, denominado oxidación activa, es ocasionado por la presencia S y Cl en la materia combustible y se manifiesta por la formación de aerosoles, depósitos y corrosión. Para determinar la tendencia de ocurrencia de este evento durante la combustión de biomasa se calcula la relación molar 2S/Cl (mol/mol) según (5). De acuerdo a la literatura si 2S/Cl > 4 el riesgo de corrosión en los tubos de las calderas es bajo, siendo deseable que su valor sea mayor a 8 a fin de asegurar una operación sin inconvenientes [16].

$$IOA = 2S / Cl \quad (5)$$

2.11. Índice de Inflamabilidad (Ii)

Este índice es un indicador de la facilidad con la cual un combustible se enciende y mantiene la combustión se calcula haciendo uso de (6). En esta expresión el poder calorífico (CV) está expresado en kcal kg⁻¹ y la materia volátil (MV_{ar}) está en base recibida. Cabe señalar que si el valor de este índice es menor a 35 la materia prima no es recomendable para su empleo como combustible en calderas [14].

$$I_i = (CV - 81CF) / (MV_{ar} + M) \quad (6)$$

2.11. Índice de Valoración del combustible (FVI)

Este índice sirve para comparar la calidad del combustible y se determina haciendo uso de (7) donde intervienen el poder calorífico inferior en base seca (LHV), la densidad aparente (BD) y el porcentaje de ceniza. Valores elevados indica un combustible de mejor calidad [17].

$$FVI = (LHV * BD) / (\text{Cenizas}) \quad (7)$$

2.13. Índice de densidad energética (ED)

Este índice relaciona la densidad aparente (BD) expresada en kg.m⁻³ con el poder calorífico inferior en base seca (LHV), expresado en MJ.kg⁻¹. Su cálculo se realizó con la ecuación (8), y el resultado quedando expresado en GJ.m⁻³ [18].

$$ED = (BD * LHV) / 1000 \quad (8)$$

2.12. Índices de escorificación, ensuciamiento y corrosión

Durante los procesos de combustión de biomasa se presentan generalmente problemas de deposición de cenizas. Si la acumulación de cenizas fundidas o sinterizadas ocurre en las superficies radiantes de la cámara de combustión el evento se denomina escorificación, y si sucede en las superficies de intercambio de calor (tubos y paredes de calderas) el evento se conoce como ensuciamiento.

Con el propósito de predecir la posible ocurrencia de estos problemas durante la combustión de las muestras ensayadas, se determinó la composición de sus cenizas mediante el análisis de fluorescencia de rayos X, conforme lo establecido por la norma ASTM D4326. Para ello se utilizó un horno de mufla isotérmico Fisher Scientific 650-58 y un espectrómetro BRUKER S4 PIONEER.

Posteriormente, se calcularon los principales índices de predicción de escorificación y ensuciamiento, entre los que se

incluyen: ratio base – ácido (B/A), índice de aglomeración del lecho (BAI), índice de ensuciamiento (Fu), y contenido de cloro (Cl). La Tabla I presenta las expresiones utilizadas para su cálculo, así como los rangos de riesgo asociados a cada índice. Cabe indicar que los óxidos se expresan en función de su porcentaje en la ceniza.

También, se empleó diagramas ternarios basados en la composición de las cenizas, según se indica en la literatura [22], para calificar el tipo de ceniza de la muestra de biomasa analizada.

TABLA I
ÍNDICES DE PREDICCIÓN DE ESCORIFICACIÓN Y ENSUCIAMIENTO

Índice	Rango	Riesgo	Ref.	Ec.
$\frac{B}{A} = \frac{F_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3}$	< 0.5 0.5 - 1 1 - 1.75 > 1.75	Bajo Medio Alto Muy alto	[19] [20]	(9)
$BAI = \frac{F_2O_3}{Na_2O + K_2O}$	< 0.15	Alto	[20]	(10)
$Fu = (B/A) (K_2O + Na_2O)$	< 0.6 0.6 - 40 > 40	Bajo Medio Alto	[19] [20]	(11)
Cl	< 0.2 0.2 - 0.3 0.3 - 0.5 > 0.5	Bajo Medio Alto Muy alto	[21]	(12)

2.13. Emisiones

Las emisiones de monóxido de carbono (E_{CO}), metano (E_{CH_4}), dióxido de carbono (E_{CO_2}), óxido nitroso (E_{NO_X}) y dióxido de azufre (E_{SO_2}) a ser generadas durante la combustión de las muestras a analizar se estiman en base a los resultados del análisis elemental de las muestras, siendo estas emisiones calculadas según (13) a (19) y expresadas en $gr.kg^{-1}$ de biomasa [18].

$$E_C = 8.8 C(\%) \quad (13)$$

$$E_{CO} = 0.14 E_C \quad (14)$$

$$E_{CH_4} = 0.0067 E_C \quad (15)$$

$$E_{CO_2} = 3.667 [E_C - 0.4285 E_{CO} - 0.75 E_{CH_4} - 0.00757] \quad (16)$$

$$E_{NO_X} = 4.0085 E_C [N(\%)/C(\%)] \quad (17)$$

$$E_{SO_2} = 0.2 S(\%) \quad (18)$$

$$E_{dust} = 1.2631 [Ceniza(\%)] \quad (19)$$

2.14. Índices de torrefacción

La evaluar el efecto de la temperatura de torrefacción en la efectividad del proceso se determinaron los valores inicial y final de la masa y del poder calorífico de la muestra.

De acuerdo a la literatura [18], el índice de variación de masa (Y_m) y el índice de variación de energía (Y_e) se determinan según (20) y (21).

$$Y_m(\%) = (m_{torref} / m_{no\ torref}) \quad (20)$$

$$Y_e(\%) = Y_m (HHV_{torref} / HHV_{no\ torref}) \quad (21)$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla II presenta los valores medios de conductividad eléctrica de la lechada (agua de lavado) obtenidos bajo las ócho condiciones de lavado aplicadas. Cada condición fue evaluada en triplicado, y los valores reportados corresponden al promedio de dichas repeticiones. Todos los ensayos se realizaron utilizando una concentración de 3.33%.

TABLA II
VALORES DE LA CONDUCTIVIDAD DE LA LECHADA

Condición	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Agitación	Conductividad $mS\ cm^{-1}$
1	20	10	sin	1.40±0.015
2	20	20	sin	1.49±0.012
3	20	10	continua	1.51±0.035
4	20	20	continua	1.54±0.026
5	80	10	sin	1.70±0.02
6	80	20	sin	1.71±0.026
7	80	10	continua	1.76±0.01
8	80	20	continua	1.83±0.006

La condición de lavado 8 obtuvo los mejores resultados lo que indica que se ha logrado la mayor remoción de los elementos solubles como los metales alcalinos Na y K así como de S y de Cl. Siendo esta la condición de lavado seleccionada para el trabajo posterior de torrefacción a 250 °C. Los resultados de la caracterización energética de las SCS (sin tratar), lavadas (SCS-L) y lavadas-torrefactadas (SCS-LT) se presentan en la Tabla III.

TABLA III
CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS

Muestras	SCS	SCS-L	SCS-LT 250°C
Análisis elemental (% peso, b.s.)			
C	43.9	52.2	57.9
H	5.52	5.29	4.46
O	40.9	36.5	29.7
N	0.33	0.30	0.45
S	0.28	0.12	0.12
Cl	0.69	0.16	0.10
Análisis inmediato (% peso, b.s.)			
Cenizas	9.10	5.60	7.4
Materia volátil	75.1	81.8	55.4
Carbono fijo	15.8	12.6	37.3
Humedad (b.r.)	13.3	13.1	6.7
Poder calorífico (MJ.kg ⁻¹ , b.s.)			
HHV	17.38	18.40	22.00
LHV	16.16	17.25	21.03
Densidad aparente (kg.m ⁻³)			
BD	17.7	80	240
Análisis de cenizas (% peso)			
Si O ₂	49.90	63.3	58.9
Al ₂ O ₃	6.65	4.7	2.72
Fe ₂ O ₃	3.02	2.64	1.56
CaO	10.10	11.1	14.8
MgO	4.08	2.93	3.4
SO ₃	8.68	3.98	7.44
Na ₂ O	2.25	0.94	0.84
K ₂ O	12.16	5.52	6.37
TiO ₂	0.04	0.25	0.14
P ₂ O ₅	1.47	1.21	1.25
Mn ₂ O ₃	0.09	0.08	0.08
SrO	0.05	0.05	0.07
Cr ₂ O ₃	n.d	n.d	n.d

Pérdida al fuego	1.00	2.5	2.0
b.r. (base recibida); b.s. (base seca)			

La Tabla IV muestra los resultados correspondientes a los índices de combustión y la estimación de emisiones, mientras que la Tabla V presenta los valores de los índices asociados a los fenómenos de escorificación y ensuciamiento.

TABLA IV
ÍNDICES DE COMBUSTIÓN Y EMISIONES

Muestras	SCS	SCS-L	SCS-LT 250°C
Índices – composición (mol/mol)			
CHO	-0.111	-0.167	-0.155
O/C	0.7	0.52	0.38
H/C	1.51	1.22	0.92
Densidad energética (GJ.m ⁻³)			
ED	0.29	1.38	5.05
Índices de combustión			
Fr	0.21	0.154	0.673
Ii	38.94	41.72	41.72
FVI	31.42	246	681.9
IOA	0.89	1.64	26.25
Factores de emisión (g.kg ⁻¹)			
E _{CO}	54.08	64.31	71.33
E _{CH4}	2.59	3.08	3.41
E _{CO2}	1324.49	1574.91	1746.89
E _{NOX}	1.16	1.06	1.59
E _{SO2}	0.06	0.02	0.02
E _{PARTÍCULAS}	11.49	7.07	9.35
E _{TOTAL}	1393.88	1650.46	1832.59

TABLA V
PREDICCIÓN DE ESCORIFICACIÓN Y ENSUCIAMIENTO

Índice	SCS	SCS-L	SCS-LT 250°C
B/A	0.56	0.339	0.437
BAI	0.210	0.49	0.216
Fu	8.05	2.19	3.15
Cl	0.69	0.16	0.01

La Fig. 1 muestra la curva de tostación a 250°C y en la Tabla VI se presentan los resultados correspondientes a las características físico-químicas, propiedades energéticas e índices de torrefacción de las muestras lavadas y torrefactadas a 250°C y 270°C.

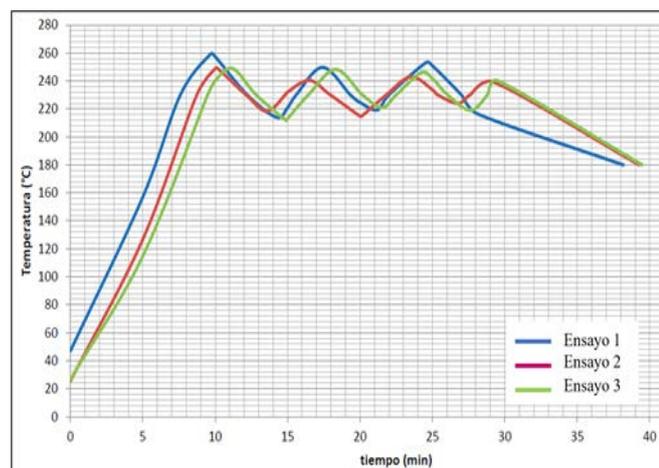


Fig. 1 Ensayos de tostación a 250°C

TABLA VI
RESULTADOS DE LAS MUESTRAS TORREFACTADAS

Muestras	SCS-LT a 250°C	SCS-LT a 270°C
M _{inicial} (g)	39.33±2.08	42
M _{final} (g)	23.67±2.31	22.67±1.15
ED (GJ m ⁻³)	5.06	6.24
HHV (MJ kg ⁻¹)	22.0	27
Índice de Torrefacción		
Y _m (%)	61.35	52.0
Y _e (%)	77	80

Como se puede apreciar en la Tabla III, los contenidos de humedad que presentaron los residuos SCS y SCS-LT fueron de 13.3% y 6.7% respectivamente. El proceso aplicado favoreció la reducción de la humedad llegando a valores considerados aceptables para procesos de combustión [23]. La reducción de humedad, además incrementó la resistencia a la formación de hongos. No se registró deterioro del producto obtenido luego de dos años de almacenamiento en condiciones normales.

Con relación al contenido de materia volátil, se registró un contenido de 75.1% en las SCS valor elevado e indica su inflamabilidad a bajas temperaturas (fácil encendido) y una alta reactividad durante la combustión [24]. En la muestra tratada SCS-LT se registró 55.4%, valor inferior comparado a lo reportado en [22] para la cascarilla de arroz (62.8%), el rastrojo de maíz (73.1%) y la paja de trigo (74.8%). Esta reducción se debe a la degradación de los polímeros debido a las temperaturas en la torrefacción. Además, esta disminución es favorable pues un alto porcentaje de volátiles demandan mayores dimensiones de la cámara de combustión [18].

En procesos termoquímicos es deseable altos contenidos de CF, debido a que está relacionado con la capacidad del combustible de convertir el carbono en productos gaseosos como H₂, CO, CO₂ y CH₄ [25]. El valor de carbono fijo medido para las SCS fue de 15.8%, para SCS-L 12.6%, de 37.3% para SCS-LT. El lavado ha tenido un efecto negativo pues redujo en 20.25% el CF, mientras que la torrefacción tuvo un efecto altamente positivo. Este resultado influyó positivamente en HHV, las SCS-LT presentaron un aumento de 1.26 veces respecto las SCS, mientras que las SCS-LT presentaron un incremento de 1.196 veces respecto a SCS-L.

Las cenizas se generan a partir de materia inorgánica, orgánica y fluida de origen natural (autigénico y detrítico) y tecnogénico durante la combustión de biomasa [26] y, guardan una relación inversa con el poder calorífico [27]. Es deseable que las biomásas posean menos de 10% de cenizas para gasificación, y hasta 20% para combustión. Bajos contenidos de cenizas requieren cámara de combustión, sistemas de evacuación de los gases y depósitos de cenizas de menor tamaño [24]. El porcentaje de cenizas fue de 9.1%, 5.6% y 7.4%, en SCS, SCS-L y SCS-LT respectivamente, lo que indica que el lavado contribuye a la reducción de las cenizas, mientras que la torrefacción genera un pequeño incremento.

Con relación a los procesos de combustión de parrilla, lecho fluidizado y lecho fluidizado circulante el contenido de cenizas de SCS y SCS-LT se hallan dentro de los límites aceptables [28].

La generación de llamas, la estabilidad en la combustión y la rapidez del consumo del combustible guardan relación

con el ratio combustible (Fr), valores mayores a 2.5 son deseados según [14]. El proceso de lavado y torrefacción mejoró la calidad del producto pues Fr paso de 0.21 a 0.673.

El Índice de Inflamabilidad (Ii) predice la facilidad con la cual un combustible puede encenderse y mantener la combustión, si el valor es menor a 35 no es recomendable su empleo en calderas [14]. El valor que presentaron las SCS fue de 38.84, el lavado y torrefactado mejoró su valor llegando a 41.76. Los resultados obtenidos son similares a los valores alcanzados en muestras de madera torrefactada como se puede apreciar en la Fig. 2 [14].

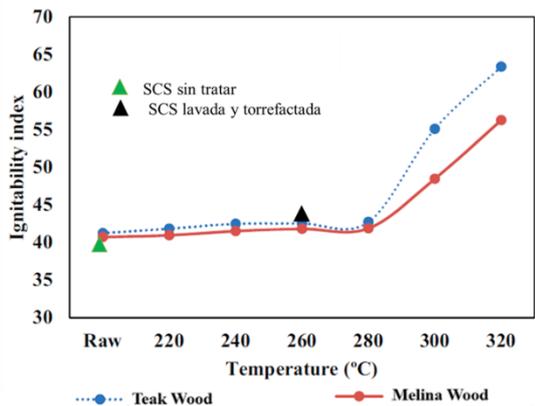


Fig. 2 Índice de Inflamabilidad y temperatura de torrefacción

Las comparaciones con estudios previos sobre residuos agrícolas permiten afirmar que las SCS presentan un mayor contenido de cenizas que el rastrojo de maíz (7.7%), la paja de trigo (7.1%). En contraste las SCS-LT exhiben valores de cenizas similares reportados en dichos estudios [22]. El diagrama ternario mostrado en la Fig. 3 evidencia que el tratamiento combinado incrementa el CF, reduce el contenido de MV como el contenido de cenizas.

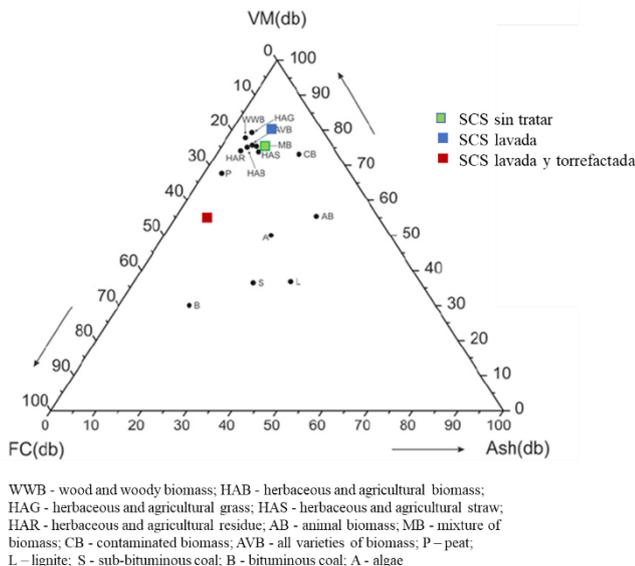


Fig. 3 Diagrama ternario inmediato (Adaptado [22])

El contenido de C, H y O en base seca de las SCS fue de 43.9%, 5.52% y 40.9% respectivamente, mientras que en el

caso de las muestras tratadas los valores obtenidos fueron de 57.9%, 4.46% y 29.7%.

En el diagrama ternario mostrado en la Fig. 4 se comparan los resultados del análisis inmediato en base seca libre de cenizas (daf) de las muestras estudiadas con otros combustibles sólidos reportados en la literatura [22]. Como se observa, el tratamiento mejora la composición de las SCS al reducir el contenido de O, lo que se traduce en el incremento del poder calorífico del 26.6%, alcanzado el valor de 22 MJ.kg⁻¹.

A partir de los contenidos de O; C e H se determinaron las relaciones molares H/C y O/C para las muestras, cuyos valores se presentan en la Tabla IV y se representan gráficamente en la Fig. 5. Como resultado del tratamiento aplicado, las SCS-LT se localizan en la región correspondiente a los carbones jóvenes (turba). La reducción en los contenidos de H y O se atribuye a la descomposición de la celulosa y hemicelulosa a causa de la torrefacción [29]. No obstante, el contenido de N experimentó un incremento posiblemente a su resistencia a la degradación.

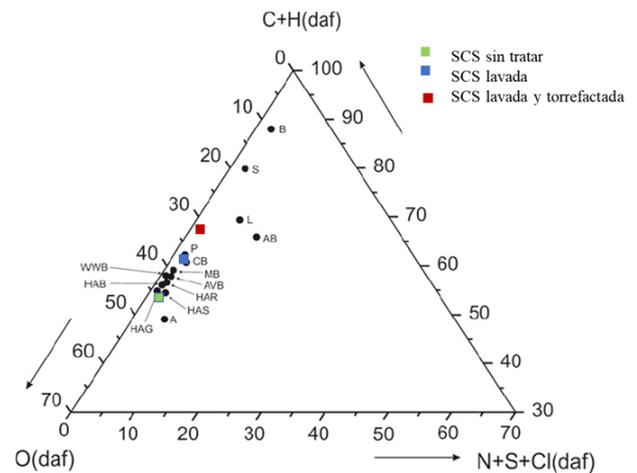


Fig. 4 Diagrama ternario elemental (Adaptado de [22])

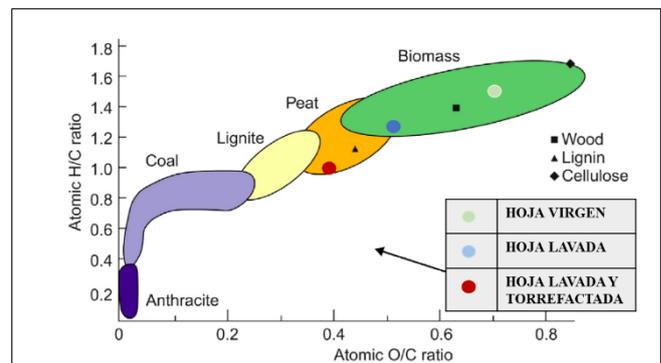


Fig. 5 Diagrama de Van Krevelen (Adaptado de [22])

Con relación al S paso de 0.28% a 0.12% gracias al proceso de lavado no se reporta variación por la torrefacción. El valor es inferior al límite de 0.2% relacionado con las

emisiones de SO_x pero superior a 0.1% relacionado con los problemas de corrosión observados en los equipos térmicos.

El proceso combinado lavado-torrefactado generó una reducción del 98.55% del Cl, la mayor efectividad se logró en la etapa de lavado. El nivel de Cl alcanzado se considera dentro de los límites aceptables en lo relacionado a emisiones, de HCl, PCDD PCDF y propensión a la corrosión.

El nitrógeno ha observado un incremento luego de la torrefacción pasando de 0.33% a 0.45%, hallándose dentro de los límites aceptables en lo relacionado a la producción de emisiones de No_x durante la combustión.

El valor del IOA en las muestras SCS indican alta probabilidad de corrosión a altas temperaturas, mientras que las SCS-LT presentan menor riesgo según lo que se señala en la literatura [16].

Como se indicó anteriormente, también se investigó el efecto de la temperatura de torrefacción, evaluando condiciones de 250°C y 270°C. Los resultados, presentados en la Tabla VI y la Fig. 6, muestran que el incremento de la temperatura aumenta el poder calorífico de 22 MJ.kg⁻¹ a 27 MJ.kg⁻¹ así como también de densidad energética (ED), que pasó de 5.06 a 6.24 GJ.m⁻³. En consecuencia, en futuros trabajos de investigación se estudiará el efecto del tratamiento combinado lavado-torrefactado a 270° y 300°C.

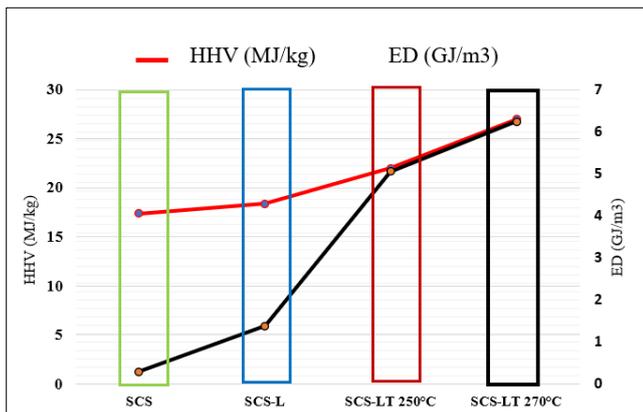


Fig. 6 Densidad energética y poder calorífico

Con relación a las cenizas, éstas en base a la composición se clasifican en 4 tipos, tipo K, tipo S, Tipo C y Tipo CK. Además, en función al grado de acidez pueden presentar bajo nivel de acidez, medio o alto. Como se puede apreciar en el diagrama ternario mostrado en la Fig. 7, las SCS y las SCS-LT califican como cenizas del tipo S – medio ácido en tanto que las SCS-L como cenizas del tipo S- con alta acidez. Esto explicaría la tendencia a formar escorias durante la combustión y las máximas temperaturas a las que se puede trabajar. Lo ideal es que pertenezcan al tipo S con elevado nivel de ácidos como los carbones minerales [22].

La predicción de los problemas de escorificación y ensuciamiento se realizó en base a los resultados del análisis de FRX aplicado a las cenizas de las muestras mediante la aplicación de un conjunto de índices anteriormente señalados.

La proporción de los componentes básicos respecto a los ácidos señalan la tendencia a la formación de escorias. El valor del B/A correspondiente para la SCS fue de 0.56

mientras que para las SCS-L de 0.339 y 0.437 para la SCS-LT. Esto indica que el lavado redujo el riesgo a la formación de escorias y aunque el torrefactado incremento el valor del índice, no llevó a la situación de riesgo.

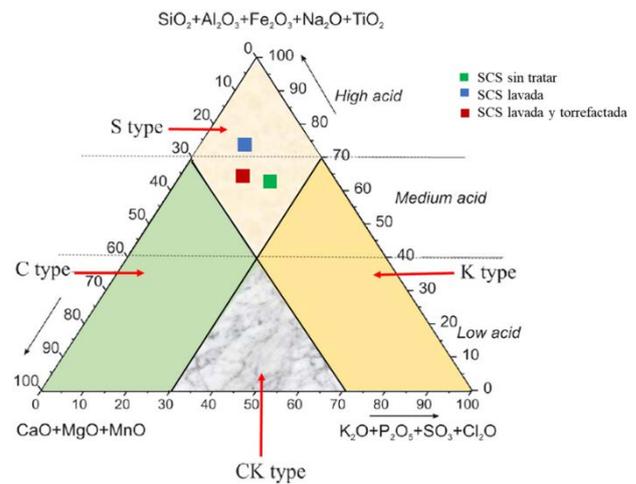


Fig. 7 Tipo de cenizas de las muestras (Adaptado de [22])

Los valores del BAI indican en todos los casos que no existe riesgo a problemas de aglomeración de las cenizas en combustión de lecho fluidizado. Con relación al índice Fu los valores calculados fueron de 8.05, 2.19 y 3.15 para las SCS. SCS-L y SCL-LT, en todos los casos existe un riesgo medio a la ocurrencia de ensuciamiento.

Finalmente, el contenido de Cl que mostraba las SCS señalaban riesgo alto a la escorificación y ensuciamiento, el lavado y torrefactado combinado redujo ese riesgo a nivel bajo.

Las emisiones totales estimadas fueron de 1369 gr.kg⁻¹ y de 1834.35 gr.kg⁻¹ para la SCS y la SCS tratadas respectivamente, correspondiendo en ambos casos más del 95% a emisiones de CO₂ lo cual, es favorable pues serán absorbidas durante el proceso de fotosíntesis.

IV CONCLUSIONES

1. El proceso aplicado mostró alta efectividad en la modificación de las propiedades de las hojas de caña de azúcar para su empleo en procesos termoquímicos al incrementar su contenido energético y reducir los problemas de escorificación y ensuciamiento sin incremento sustancial de las emisiones.
2. Las condiciones seleccionadas para el lavado con agua destilada 3.33% de concentración, 80°C de temperatura, 20 minutos con agitación continua fueron determinadas a partir del máximo valor de la conductividad de la lechada.
3. El proceso de lavado demostró alta efectividad en la reducción de cenizas, remoción de metales alcalinos (sodio y potasio) así como del azufre (S) y cloro (Cl), contribuyendo a reducir la formación de escorias durante la combustión, aglomeración de las mismas y problemas de corrosión
4. La torrefacción aplicada a 250°C mejoró las características térmicas del producto como el poder calorífico, la densidad energética, reduciendo la humedad a

valores considerados aceptables para procesos de combustión.

5. La torrefacción incrementó la hidrofobicidad del producto. La reducción de humedad, además incrementó la resistencia a la formación de hongos. No se registró deterioro del producto obtenido luego de dos años de almacenamiento en condiciones normales

6. Los índices aplicados permiten pronosticar un adecuado comportamiento de las SCS-LT durante la combustión y las emisiones.

7. Se plantea como línea futura de investigación la evaluación del tratamiento combinado de lavado y torrefacción a temperaturas más elevadas (270 °C y 300 °C), con el objetivo de determinar las condiciones óptimas para maximizar el rendimiento energético del residuo.

REFERENCIAS

- [1] International Energy Institute (IEI), “Statistical Review of World Energy 2023,” *BP Energy Outlook 2023*, vol. 70, pp. 8–20, 2023.
- [2] A. Alengebawy, Y. Ran, N. Ghimire, A. I. Osman, and P. Ai, *Rice straw for energy and value-added products in China: a review*, vol. 21, no. 5. 2023. doi: 10.1007/s10311-023-01612-3.
- [3] S. Y. Park, K. C. Oh, S. J. Kim, L. H. Cho, Y. K. Jeon, and D. H. Kim, “Development of a Biomass Component Prediction Model Based on Elemental and Proximate Analyses,” *Energies*, vol. 16, no. 14, pp. 1–17, 2023, doi: 10.3390/en16145341.
- [4] E. Assureira and M. Assureira, “Rice Straw and Sugarcane Straw Agrowaste for Energy Production: Physico-chemical Characteristics and Prediction of their Thermal Behaviour,” *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, pp. 0–9, 2024, doi: 10.18687/LACCEI2024.1.1.1584.
- [5] H. Hariana, H. Ghazidin, A. Darmawan, E. Hilmawan, Prabowo, and M. Aziz, “Effect of additives in increasing ash fusion temperature during co-firing of coal and palm oil waste biomass,” *Bioresour Technol Rep*, vol. 23, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.biteb.2023.101531.
- [6] Y. Zhu, Y. Niu, H. Tan, and X. Wang, “Short review on the origin and countermeasure of biomass slagging in grate furnace,” *Frontiers in Energy Research*, vol. 2, no. February, pp. 1–10, 2014, doi: 10.3389/fenrg.2014.00007.
- [7] S. Zhang, Q. Dong, L. Zhang, and Y. Xiong, “Effects of water washing and torrefaction on the pyrolysis behavior and kinetics of rice husk through TGA and Py-GC/MS,” *Bioresour Technol*, vol. 199, pp. 352–361, 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2015.08.110.
- [8] A. A. Rahman, F. Sulaiman, and N. Abdullah, “Influence of Washing Medium Pre-treatment on Pyrolysis Yields and Product Characteristics of Palm Kernel Shell,” *Journal of Physical Science (ISSN 1675-3402) published by Penerbit Universiti Sains Malaysia*, vol. 27, no. 1, pp. 53–75, 2016.
- [9] D. A. Granados, P. Basu, and F. Chejne, “Biomass Torrefaction in a Two-Stage Rotary Reactor: Modeling and Experimental Validation,” *Energy and Fuels*, vol. 31, no. 5, pp. 5701–5709, May 2017, doi: 10.1021/acs.energyfuels.7b00653.
- [10] T. A. Mamvura and G. Danha, “Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production,” Mar. 01, 2020, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03531.
- [11] Food and Agricultural Organization (FAO), *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2023*. Rome, 2023. doi: 10.4060/cc8165en.
- [12] E. Assureira and M. Assureira, “Energy potential of agricultural residues in Peru for use in thermochemical processes,” *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, vol. 2022–July, pp. 1–9, 2022, doi: 10.18687/LACCEI2022.1.1.670.
- [13] R. Sindhu, E. Gnansounou, P. Binod, and A. Pandey, “Bioconversion of sugarcane crop residue for value added products – An overview,” *Renew Energy*, vol. 98, pp. 203–215, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.02.057.
- [14] A. A. Adeleke, J. K. Odusote, P. P. Ikubanni, O. A. Lasode, M. Malathi, and D. Paswan, “The ignitability, fuel ratio and ash fusion temperatures of torrefied woody biomass,” *Heliyon*, vol. 6, no. 3, p. e03582, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03582.
- [15] J. Cai *et al.*, “Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, no. March, pp. 309–322, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.072.
- [16] P. Sommersacher, T. Brunner, and I. Obernberger, “Fuel Indexes : A Novel Method for the Evaluation of Relevant Combustion Properties of New Biomass Fuels,” *Energy Fuels*, vol. 26, no. 1, pp. 380–390, 2012, doi: https://doi.org/10.1021/ef201282y.
- [17] J. L. F. Alves *et al.*, “Demonstrating the Suitability of Tamarind Residues to Bioenergy Exploitation Via Combustion Through Physicochemical Properties, Performance Indexes, and Emission Characteristics,” *Bioenergy Research*, vol. 13, no. 4, pp. 1308–1320, 2020, doi: 10.1007/s12155-020-10158-z.
- [18] B. Gajera, A. Datta, N. Gakkhar, and A. K. Sarma, “Torrefied Mustard Straw as a Potential Solid Biofuel: a Study with Physicochemical Characterization and Thermogravimetric and Emission Analysis,” *Bioenergy Research*, vol. 16, no. 4, pp. 2371–2385, 2023, doi: 10.1007/s12155-023-10600-y.
- [19] B. Gudka, J. M. Jones, A. R. Lea-Langton, A. Williams, and A. Saddawi, “A review of the mitigation of deposition and emission problems during biomass combustion through washing pre-

- treatment,” *Journal of the Energy Institute*, vol. 89, no. 2, pp. 159–171, 2016, doi: 10.1016/j.joei.2015.02.007.
- [20] J. Lachman, M. Baláš, M. Lisý, H. Lisá, P. Milčák, and P. Elbl, “An overview of slagging and fouling indicators and their applicability to biomass fuels,” *Fuel Processing Technology*, vol. 217, no. 106804, 2021, doi: 10.1016/j.fuproc.2021.106804.
- [21] A. Garcia-Maraver, J. Mata-Sanchez, M. Carpio, and J. A. Perez-Jimenez, “Critical review of predictive coefficients for biomass ash deposition tendency,” *Journal of the Energy Institute*, vol. 90, no. 2, pp. 214–228, 2017, doi: 10.1016/j.joei.2016.02.002.
- [22] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, and C. G. Vassileva, “An overview of the chemical composition of biomass,” *Fuel*, vol. 89, no. 5, pp. 913–933, 2010, doi: 10.1016/j.fuel.2009.10.022.
- [23] Z. Chaula, M. Said, G. John, S. Manyele, and C. Mhilu, “Modelling the Suitability of Pine Sawdust for Energy Production via Biomass Steam Explosion,” *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 05, no. 01, pp. 1–7, 2014, doi: 10.4236/sgre.2014.51001.
- [24] N. Hossain, “Characterization of Novel Moss Biomass, *Bryum dichotomum* Hedw. as Solid Fuel Feedstock,” *Bioenergy Research*, vol. 13, no. 1, pp. 50–60, 2020, doi: 10.1007/s12155-019-10086-7.
- [25] J. L. F. Alves, J. C. G. da Silva, V. F. da Silva Filho, R. F. Alves, W. V. de Araujo Galdino, and R. F. De Sena, “Kinetics and thermodynamics parameters evaluation of pyrolysis of invasive aquatic macrophytes to determine their bioenergy potentials,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 121, no. September 2018, pp. 28–40, 2019, doi: 10.1016/j.biombioe.2018.12.015.
- [26] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, and C. G. Vassileva, “An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification,” *Fuel*, vol. 105, pp. 40–76, 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2012.09.041.
- [27] G. Zając, J. Szyszlak-Bargłowicz, W. Gołębiowski, and M. Szczepanik, “Chemical characteristics of biomass ashes,” *Energies*, vol. 11, no. 11, pp. 1–15, 2018, doi: 10.3390/en11112885.
- [28] I. Obernberger, T. Brunner, and G. Bärnthaler, “Chemical properties of solid biofuels-significance and impact,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, no. 11, pp. 973–982, 2006, doi: 10.1016/j.biombioe.2006.06.011.
- [29] P. Kongto *et al.*, “Intensive exploration of the fuel characteristics of biomass and biochar from oil palm trunk and oil palm fronds for supporting increasing demand of solid biofuels in Thailand,” *Energy Reports*, vol. 8, no. November, pp. 5640–5652, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.04.033.