

# Rice Straw and Sugarcane Straw Agrowaste for Energy Production: Physico-chemical Characteristics and Prediction of their Thermal Behaviour

Estela Assureira, Mg.<sup>1</sup>, Marco Assureira, Ing.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, eassure@pucp.edu.pe

<sup>2</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, assureira.ma@pucp.edu.pe

**Abstract**– *The growth in population leads to higher food and energy requirements, along with increased waste and greenhouse gas emissions. To create a sustainable environment, utilizing agricultural waste as an energy source is crucial. This option offers a consistent supply, widespread presence, and helps reduce environmental harm caused by burning practices and CO<sub>2</sub> emissions.*

*Sugarcane and rice, crops of global importance, annually generate around  $0.6 \cdot 10^9$  tons of sugarcane straw (SCS) and  $1.3 \cdot 10^9$  tons of rice straw (RS). Due to their low nutritional value, they are not used as livestock feed, and their accumulation in crop fields causes the proliferation of vectors, which is why these agrowastes are burned or thrown into rivers, generating pollution. The valorization of SCS and RS for their use in energy generation, will have a profound impact as it will contribute positively to the incorporation of new energy alternatives, as well as to waste management and the reduction of emissions. The present research work, of an experimental nature, focuses on the energy production process from SCS and RS, having carried out the characterization and energy analysis of these agrowastes for their use in combustion. The heating value for the SCS and the RS were  $17.4 \text{ MJ kg}^{-1}$  and  $14.9 \text{ MJ kg}^{-1}$  respectively, while the moisture was less than 12% in both cases. The high content of K and Na determines the low melting temperature of the ashes. The percentage of S and Cl exceed the recommended values, which will lead to corrosion and emissions of SO<sub>x</sub> and HCl. The prediction of ash deposition on the surfaces of heat transfer equipment has been carried out based on the results of the ash composition of these agrowastes and the application of a set of indices. The values of the Base/Acid Index (B/A) and the Fouling Index (Fu) indicate an average tendency towards ash deposition for both agrowastes, which was corroborated by the deformation temperatures (DT) and hemisphere temperatures (HT) estimated by using ternary diagrams. The DT values were less than 1100°C in both cases, and the estimated HT temperature for the case of the RS was between 1200 and 1400°C, while for the SCS it was less than 1200°C. The total emissions estimated were  $1229 \text{ gr kg}^{-1}$  and  $1396 \text{ gr kg}^{-1}$  for RS and SCS respectively, in both cases corresponding more than 93% to CO<sub>2</sub> emissions, which is favorable as they will be absorbed during the photosynthesis process. The low density observed for SCS indicates the need to cut, bale, or compact SCS in order to reduce transportation and storage costs. This research work provides information on the properties and energetic behaviour of SCS and RS for their use as fuel in thermochemical process, as well as guidelines to enhance their thermal properties through the application of pre-treatments, such as water leaching, to reduce*

*the percentage of alkali metals, Cl and S, in order to increase the values of the ash fusion temperatures and thus reduce the risk of slagging and fouling in thermal equipment.*

**Keywords**– *Agrowastes, Sugarcane Straw, Rice Straw, Slagging, Fouling.*

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

# Paja de Arroz y Hojas de Caña de Azúcar Residuos para la Producción de Energía: Características Físico Químicas y Predicción de su Comportamiento Térmico

Estela Assureira, Mg.<sup>1</sup>, Marco Assureira, Ing.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, eassure@pucp.edu.pe

<sup>2</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, assureira.ma@pucp.edu.pe

**Abstract**– El continuo aumento de la población trae consigo un incremento en la demanda de alimentos y de energía, así como en la generación de residuos y de gases de efecto invernadero. En la búsqueda de nuevas alternativas energéticas que hagan un mundo más sostenible para vivir, el empleo de los residuos agrícolas como fuente de energía es una opción interesante, por su permanente disponibilidad, amplia localización geográfica, y por la necesidad de gestionarlos adecuadamente para evitar prácticas como la quema, causante de daños ambientales por las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas.

La caña de azúcar y el arroz, cultivos de importancia mundial, anualmente generan alrededor de  $0.6 \cdot 10^9$  TM de hojas (SCS) y  $1.3 \cdot 10^9$  TM de pajilla (RS). Por su reducido valor nutritivo no se emplean como alimento para el ganado, y su acumulación en los campos de cultivo causa la proliferación de vectores razón por lo cual, estos residuos son quemados o arrojados a los ríos generando contaminación. Por ello el proceso de valorización de la SCS y RS, para su empleo en la generación de energía, tendrá un impacto profundo pues contribuirá positivamente en la incorporación de nuevas alternativas energéticas, así como en la gestión de residuos y en la reducción de emisiones.

El presente trabajo, de naturaleza experimental, está enmarcado en el proceso de valorización energética de los residuos SCS y RS y, ha comprendido la caracterización y análisis energético para su empleo en combustión. El poder calorífico hallado para la SCS y la RS fue de  $17.4 \text{ MJ.kg}^{-1}$  y  $14.9 \text{ MJ.kg}^{-1}$  respectivamente, mientras que el porcentaje de humedad fue menor al 12% en ambos casos. El alto contenido de K y Na determina la baja temperatura de fusión de sus cenizas. El porcentaje de S y Cl superan los valores recomendados lo cual, generará problemas de corrosión y emisiones de SO<sub>x</sub> y HCl. El contenido de N es reducido, por lo no se advierte posibilidades de emisiones de NO<sub>x</sub>. Además, no se ha registrado la presencia de metales pesados.

La predicción de deposición de cenizas en las superficies de los equipos de transferencia de calor se ha realizado a partir de los resultados de la composición de las cenizas de estos residuos y de la aplicación de un conjunto de índices. Los valores del Índice de base/ácido (B/A) y del Índice de ensuciamiento (Fu) indican una tendencia media a la deposición cenizas para ambos residuos lo cual, se corrobora con las temperaturas de deformación (DT) y de hemisferio (HT) estimadas mediante el uso de diagramas ternarios. Los valores de DT hallados fueron menores a  $1100^\circ\text{C}$  en ambos casos, y la temperatura HT estimada para el caso de la RS se encuentra entre  $1200$  y  $1400^\circ\text{C}$ , mientras que para la SCS resultó menor a  $1200^\circ\text{C}$ .

Las emisiones totales estimadas fueron de  $1229 \text{ gr.kg}^{-1}$  y de  $1396 \text{ gr.kg}^{-1}$  para la RS y la SCS respectivamente, correspondiendo en ambos casos más del 93% a emisiones de CO<sub>2</sub> lo cual, es favorable pues serán absorbidas durante el proceso de fotosíntesis. La baja densidad observada para SCS indica la necesidad de trozar,

enfardar o compactar las SCS para reducir los costos de transporte y almacenamiento.

El trabajo realizado brinda información sobre las propiedades y el comportamiento energético de la SCS y la RS para su empleo como combustible, así como orientaciones para potenciar sus propiedades térmicas mediante la aplicación de pre-tratamientos, como el lavado con agua, para reducir las emisiones de SO<sub>x</sub> y HCl; reducir también el porcentaje de metales alcalinos, Cl y S, incrementando los valores de las temperaturas de fusión de sus cenizas y reduciendo el riesgo de ocurrencia de problemas escorificación y ensuciamiento en los equipos térmicos.

**Palabras clave**– Hojas de caña, Pajilla de arroz, Escorificación, Ensuciamiento, Propiedades físico-químicas.

## I. INTRODUCCIÓN

El consumo de recursos naturales y de energía continuará en continuo incremento debido al crecimiento de la población y de las actividades económicas. Según datos de ONU en el año 2023 la población mundial fue de 8,045 millones de personas y, se espera que en el 2030 supere los 8,500 millones, lo que genera un continuo crecimiento de la demanda de alimentos, vivienda, y energía [1].

La FAO reporta que en el año 2021 se produjeron  $9.5 \cdot 10^9$  TM de alimentos mostrando un crecimiento de 1.9% respecto al año anterior, concentrándose el 20% en la producción en la caña de azúcar, el 10% en el arroz cáscara 10%, el 10% en el trigo y 10% en el maíz [2].

Con relación a la producción de energía, la Agencia Internacional de la Energía (IEA) señala que en el año 2022 se produjeron 632 EJ, 1.3% más que en el 2022. correspondiendo el 79.8% a los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), el 11.9 % a las energías renovables (solar, eólica hidráulica y bioenergía), el 4.6 % al consumo de leña y la diferencia a la energía nuclear [3].

La continua evolución de la humanidad, trae consigo no sólo un continuo aumento en la demanda de recursos, sino también, en la generación de residuos así como de gases de efecto invernadero. El Banco Mundial estima que cada año se recolectan en el mundo aproximadamente 11,200 millones de toneladas de residuos sólidos y que en el año 2050 llegaría a 3.4 billones de TM de residuos, es decir 1.6 veces más [4]. Según lo señalado en [5] las emisiones de CO<sub>2</sub> han tenido también un continuo incremento como consecuencia del uso intensivo de los recursos, en el año 2000 las emisiones de CO<sub>2</sub> fueron de 25,500 millones de TM, en el 2023 alcanzaron la cifra de 37,550 millones de TM, siendo los combustibles fósiles los que más contribuyeron con el 65%. Ante este panorama es preciso cambiar el estilo de vida minimizando el

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

uso de recursos, reduciendo la generación de desechos, de emisiones y de pérdidas de energía para ser un mundo más sostenible.

La Bioenergía, energía obtenida de los recursos biomásicos y que no incluye el uso de la leña, es una excelente posibilidad energética para reemplazar a los combustibles fósiles, por su carácter renovable, por ser un combustible neutro en carbono con bajo contenido de nitrógeno y azufre [6]. Diversas especies maderables, numerosos residuos agrícolas y forestales, cultivos energéticos y residuos municipales pueden ser usados para la producción de energía [7]. Sin embargo, el uso de residuos agrícolas en procesos de generación de energía tiene como ventajas su permanente disponibilidad y su distribución relativamente uniforme en todas las regiones a diferencia de los combustibles fósiles que se concentran en determinadas zonas [8].

Los residuos agrícolas se clasifican de acuerdo a su composición en cuatro categorías: biomasa lignocelulósica, biomasa oleógena, biomasa alcohólica y biomasa amilácea. De todas ellas, la biomasa lignocelulósica llamada así por estar compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina [9]. En [10] se puntualiza que la biomasa lignocelulósica es la materia prima más abundante en el planeta, en promedio se generan 200 mil millones de toneladas anualmente. Su conversión en energía según lo indicado en [6] puede realizarse aplicando procesos termoquímicos (combustión, gasificación, pirólisis, liquefacción, carbonización y co-combustión), bioquímicos (digestión anaerobia) siendo los procesos termoquímicos los más fáciles de implementar. El proceso de combustión es el que ha alcanzado mayor madurez tecnológica [11].

Los procesos agrícolas generan grandes volúmenes de residuos lignocelulósicos en todas sus etapas. Durante la cosecha pajas, ramas y hojas quedan esparcidas en los campos mientras que en los procesos de conversión en las plantas de procesamiento se hallarán cáscaras, pepas, fibras. Algunos residuos por sus características son empleados como alimento para el ganado o como fertilizantes, otros al no tener utilidad, son vertidos en botaderos o bien son quemarlos para evitar problemas fitosanitarios que ocasionaría su acumulación [11]. Esta práctica, muy frecuente en países en desarrollo, provoca contaminación. La quema de residuos agrícolas debe ser erradicada pues contribuye con el 3.5% de las emisiones de CO<sub>2</sub> [5].

De acuerdo a lo señalado en [12] las biomásas hojas de caña de azúcar y la pajilla de arroz, califican en la categoría de biomásas lignocelulósicas por estar constituidas principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Esta estructura favorece su empleo como combustible de primera y segunda generación. El volumen de residuos generado depende de la especie, la localización geográfica, así como de las prácticas de cultivo. En la referencia [13], se señala que por cada tonelada de arroz cáscara se generan 1.35 TM de pajilla, mientras que en la referencia [14] se considera que por cada tonelada de caña de azúcar quedan en los campos de cultivo 0.25 TM de hojas. Estos residuos por su alto

contenido de sílice no son adecuados para la alimentación del ganado [7]. Los contenidos de K, P les confieren propiedades fertilizantes sin embargo, se debe de dejar sólo una fracción del material, cantidades excesivas ocasionarían proliferación de vectores y peligros de incendio [11].

Debido a su baja densidad y dispersión en los campos de cultivo, existe poco interés en el empleo de las hojas de caña de azúcar y de la pajilla de arroz como combustible, debido a los costos de recojo y transporte a los posibles puntos de uso limitándose su uso en pequeña escala y de forma tradicional en procesos de combustión directa ineficiente [15]. A esto se suma que por el escaso conocimiento sobre sus propiedades físico-químicas en procesos de combustión se han presentado problemas relacionados a incrustaciones, escoriaciones y corrosión y, además, desgaste por erosión en las superficies de intercambio de calor de la caldera [16]. Urge la adopción de medidas orientadas a reducir la generación de residuos y a desarrollar procesos donde las hojas de caña de azúcar y la pajilla de arroz puedan ser reinsertados en la cadena productiva para la generación de energía o como insumos para la producción de bio-materiales. En algunos casos se usarán en el estado en el cual se hallan en otros luego de alguna transformación como mediante procesos de lavado para mejorar sus propiedades energéticas [17].

El proceso de valorización, término que significa convertir un elemento considerado carente de valor en un elemento adecuado para su empleo en un proceso productivo, tendrá un impacto profundo contribuyendo con el uso racional de recursos y con la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero. La valorización de los residuos, a los que en adelante se denominarán “sub-producto” es un proceso complejo en el cual se deben de considerar el volumen de residuos disponible, sus características energéticas, así como los costos que implican la recolección y el transporte [11].

Según lo señalado en [18], para la valorización energética de un producto, para su uso como combustible, se requiere determinar la cantidad de energía que éste posee a través de hallar su poder calorífico. Además, los contenidos de carbono fijo, materia volátil y cenizas que aportarán información valiosa para predecir comportamiento térmico (inflamabilidad, cantidad de residuos que hay que retirar) y los contenidos de C, H y O servirán para estimar la cantidad de aire requerido para el proceso mientras que los porcentajes de N, S y Cl serán de utilidad para analizar emisiones y problemas de corrosión [18]. Finalmente en [12], se remarca la importancia de conocer la composición de las cenizas por su relación con los problemas de escoriación y ensuciamiento que se suelen presentar en las calderas de lecho fijo que utilizan biomásas pues durante la combustión. También, se señala que el alto contenido de alcalis en las biomásas determina menores temperaturas de fusión de las cenizas que la observada en carbones minerales por lo que es deseable trabajar con biomásas que tengan altas temperaturas de fusión de cenizas [19].

El objetivo de este trabajo fue la caracterización físico-química de las hojas de caña de azúcar y pajilla de arroz y el

análisis de sus efectos en el comportamiento de las biomásas en procesos de combustión y así como los lineamientos a seguir para reducir los problemas identificados.

El trabajo realizado ha comprendido la caracterización físico-química mediante la aplicación del análisis inmediato, análisis elemental, análisis de cenizas y la determinación del poder calorífico. A partir de los resultados de los análisis y mediante la aplicación de diversos índices se ha realizado la predicción de su comportamiento térmico con especial énfasis en los problemas de escorificación y ensuciamiento durante la operación, se han estimado las temperaturas de deformación y hemisferio. También, se ha realizado la estimación de emisiones de CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub> que generaría el residuo en procesos de combustión.

## II. MATERIALES Y METODOLOGÍA

### 2.1. Recolección y preparación de las muestras

En la presente investigación se trabajó con dos residuos la pajilla de arroz, denominada de aquí en adelante como RS-PUCP, proveniente de campos de cultivo ubicados en el departamento de La Libertad, provincia de Chepén; y las hojas de caña de azúcar, designadas como SCS-PUCP, recolectadas en el departamento de Piura, provincia de Sullana, también en campos de cultivo luego de las labores de cosecha.

Antes realizar la caracterización de estas biomásas se procedió a su homogenización por cuarteo a fin de obtener una muestra representativa la cual, se fue secada al sol, molida y tamizada hasta una granulometría de partícula menor a 246 micras. En el caso de las SCS-PUCP, debido a sus mayores dimensiones se requirió, como paso previo a su molienda, reducir su tamaño a una longitud de 2 a 3 cm, utilizando para ello una guillotina de accionamiento manual. Finalmente, las muestras preparadas se almacenaron en bolsas Ziploc que se sellaron y codificaron convenientemente. Todos los análisis de evaluación se replicaron tres veces trabajándose con el valor promedio.

### 2.2. Análisis próximo

Este análisis determina los contenidos de humedad (M), cenizas, materia volátil (MV) y carbono fijo (CF), presentes en las muestras, los resultados son expresados como porcentaje en peso. Para la determinación de estos parámetros se aplicaron los procedimientos indicados por las normas ASTM D3173, ASTM D3174, ASTM D3175 y ASTM D3172, empleándose un horno de mufla isotérmico Fisher Scientific serie 650-58 para determinar el contenido de ceniza; un horno HOSKINS FA120 para hallar el contenido de la materia volátil; y un horno GRIEVE LR271 para la determinación de la humedad de las muestras. El carbono fijo se calculó por diferencia haciendo uso de (1).

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

### 2.2. Análisis Elemental

Se aplica para determinar de forma cuantitativa la composición elemental de las muestras en estudio. Los contenidos de carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S) y

nitrógeno (N), son expresados como porcentaje en peso siguiendo los procedimientos y especificaciones señalados en las normas ASTM D3178, ASTM D3177 y ASTM D3179 respectivamente.

El oxígeno (O) se calcula 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.

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

Para la determinación de los parámetros C y H se empleó un horno Thermo Scientific STF55433C Lindberg/Blue M; para el caso del N se empleó una unidad de digestión conformada por un frasco Kjeldahl con mechero Fisher y una unidad de destilación; mientras que para hallar la cantidad de S se empleó una bomba calorimétrica isotérmica Parr 1341.

También, se determinó la cantidad de cloro (Cl) empleando para ello una bomba calorimétrica isotérmica Parr 1341 y siguiendo lo establecido por la norma ASTM D2361.

### 2.3. Poder calorífico

El contenido energético de los residuos se determinó hallando el valor del poder calorífico superior (HHV) para lo cual, se utilizó una bomba calorimétrica isotérmica Parr 1341 y siguieron los procedimientos establecidos por la norma ASTM D5865. Los resultados se expresan en la unidad de MJ kg<sup>-1</sup>.

### 2.4. La densidad aparente

La densidad aparente (BD) se define como la relación masa de la muestra por unidad de volumen el cual, incluye los espacios vacíos entre las partículas de la muestra. El valor de BD se expresa en kg/m<sup>3</sup> y se determina aplicando la norma ASTM E-873-82.

### 2.5. Índice ratio de combustible

El índice ratio de combustible (Fr) está relacionado con la estabilidad y duración de la combustión y, la generación de llamas. Se determina como se indica en (3).

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

### 2.6. Estado de oxidación del carbono

El índice CHO se utiliza para calificar el estado de oxidación en el cual se halla el carbono en las muestras a analizar, su valor se puede hallar entre -4 y +4. El extremo inferior del intervalo indica un alto contenido de H mientras que el extremo superior señala un alto contenido de O. Para su determinación se aplica (4) [20].

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

### 2.8. Índice de oxidación activa

La presencia de S y Cl en una muestra de biomasa está asociada con la formación de aerosoles, depósitos y corrosión. Para determinar el riesgo de corrosión a altas temperaturas en las calderas, (oxidación activa) por la presencia de estos elementos se determina la relación molar 2S/Cl (mol/mol) como se muestra en (5). Según se señala en



la literatura si  $2S/Cl > 4$  el riesgo de corrosión en los tubos de las calderas es bajo, siendo recomendable que sea mayor a 8 para asegurar una operación sin la ocurrencia de este problema [21].

$$\text{Índice de Oxidación Activa} = 2S / Cl \quad (5)$$

### 2.9. Índices predictivos de problemas de escorificación, ensuciamiento y corrosión

La escorificación (slagging en inglés) es el proceso de acumulación de partículas de cenizas fundidas o sinterizadas las cuales se depositan en las superficies radiantes de la cámara de combustión. El ensuciamiento (fouling en inglés) consiste en la deposición de cenizas en las superficies de intercambio de calor (tubos y paredes de calderas).

Con la finalidad de predecir la posibilidad de escorificación y ensuciamiento de las muestras ensayadas primero se determinó la composición de las cenizas mediante el ensayo de fluorescencia de rayos X, siguiendo los procedimientos establecidos por la norma ASTM D4326. Las muestras se prepararon utilizando un horno de mufla isotérmico Fisher Scientific serie 650-58 y luego se empleó un espectrómetro BRUKER S4 PIONEER. Seguidamente, se calcularon una serie de índices a fin de establecer el riesgo de problemas de deposición de cenizas, siendo éstos: el ratio base – ácido (B/A), el índice de aglomeración del lecho (BAI), el índice de viscosidad de la escoria (Sr), el índice de ensuciamiento (Fu), el índice de escorificación (Rs) y el contenido de cloro (Cl), cuyas expresiones de cálculo y rangos de predicción se presentan en la Tabla I. Cabe señalar que los óxidos representan el porcentaje en el que se encuentran en la ceniza.

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<br>0.5 - 1<br>1 - 1.75<br>> 1.75   | Bajo<br>Medio<br>Alto<br>Muy alto | [19]<br>[22] | (6) |
| $BAI = \frac{F_2O_3}{Na_2O + K_2O}$   | < 0.15                                   | Alto                              | [19]<br>[22] | (7) |
| $Fu = (B/A) (K_2O + Na_2O)$   | < 0.6<br>0.6 - 40<br>> 40                | Bajo<br>Medio<br>Alto             | [19]<br>[22] | (8) |
| Cl  | < 0.2<br>0.2 - 0.3<br>0.3 - 0.5<br>> 0.5 | Bajo<br>Medio<br>Alto<br>Muy alto | [22]         | (9) |

Adicionalmente, se utilizaron diagramas ternarios desarrollados por Vassilev et al. [23] y Lachman et al. [19] en base a la composición de las cenizas para estimar las temperaturas inicial de deformación (DT) y hemisférica (HT) a fin de identificar el tipo de ceniza y predecir la tendencia a la ocurrencia de los problemas de deposición de ceniza señalados. En el trabajo se han aplicado los métodos gráficos

pues como se señala en [19] muestran buena aproximación al fenómeno además que resulta fácil de implementación

### 2.10. Emisiones

Se ha estimado el valor de las emisiones de de monóxido de carbono ( $E_{CO}$ ), metano ( $E_{CH_4}$ ), dióxido de carbono ( $E_{CO_2}$ ), óxido nitroso ( $E_{NOX}$ ) y dióxido de azufre ( $E_{SO_2}$ ) en gr por kg de biomasa aplicando las ecuaciones sugeridas en [24]. Como se puede observar los valores se calculan a partir de los resultados del análisis elemental o último.

$$E_C = 8.8 C(\%) \quad (10)$$

$$E_{CO} = 0.14 E_C \quad (11)$$

$$E_{CH_4} = 0.0067 E_C \quad (12)$$

$$E_{CO_2} = 3.667 [363.79 - 0.4285 E_{CO} - 0.75 E_{CH_4} - 0.00757] \quad (15)$$

$$E_{NOX} = 4.0085 E_C [N(\%)/C(\%)] \quad (13)$$

$$E_{SO_2} = 0.2 S(\%) \quad (14)$$

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla II se presentan los resultados correspondientes a las características físico-químicas, propiedades energéticas y factores de emisión de las muestras RS-PUCP y SCS-PUCP analizadas.

TABLA II  
CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS

| Muestras                                  | RS-PUCP | SCS-PUCP |
|---|---------|----------|
| Análisis elemental (% peso, b.s.)         |         |          |
| C   | 37.98   | 43.9     |
| H   | 4.91    | 5.52     |
| O   | 34.71   | 40.9     |
| N   | 0.83    | 0.33     |
| S   | 0.22    | 0.28     |
| Cl  | 0.63    | 0.69     |
| Análisis inmediato (% peso, b.s.)         |         |          |
| Cenizas                                   | 20.73   | 9.1      |
| Materia volátil                           | 63.65   | 75.1     |
| Carbono fijo                              | 15.62   | 15.8     |
| Humedad (b.r.)                            | 5.81    | 6.27     |
| Poder calorífico (MJ kg <sup>-1</sup> )   |         |          |
| HHV (b.s.)                                | 14.87   | 17.38    |
| Índices – composición (mol/mol)           |         |          |
| CHO                                       | -0.180  | -0.111   |
| O/C                                       | 0.69    | 0.7      |
| H/C                                       | 1.55    | 1.51     |
| Densidad                                  |         |          |
| Aparente (kg.m <sup>-3</sup> )            | 81      | 17.7     |
| Energética (GJ m <sup>-3</sup> )          | 1.2     | 0.31     |
| Índice de ratio de combustión             |         |          |
| CF/MV                                     | 0.24    | 0.21     |
| Factores de emisión (g kg <sup>-1</sup> ) |         |          |
| $E_{CO}$                                  | 46.79   | 54.08    |
| $E_{CH_4}$                                | 2.24    | 2.59     |
| $E_{CO_2}$                                | 1145.88 | 1324.49  |
| $E_{NOX}$                                 | 2.93    | 1.16     |
| $E_{SO_2}$                                | 0.04    | 0.06     |
| $E_{PARTÍCULAS}$                          | 31.10   | 13.65    |
| $E_{TOTAL}$                               | 1228.97 | 1396.03  |
| Análisis de cenizas (% peso)              |         |          |
| Si O <sub>2</sub>                         | 70.25   | 49.90    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>            | 0.54    | 6.65     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>            | 0.46    | 3.02     |

|  |             |        |
|--|-------------|--------|
| CaO  | 4.26        | 10.10  |
| MgO  | 1.76        | 4.08   |
| SO <sub>3</sub>  | 3.06        | 8.68   |
| Na <sub>2</sub> O  | 2.24        | 2.25   |
| K <sub>2</sub> O   | 11.02       | 12.16  |
| TiO <sub>2</sub>   | 0.00        | 0.04   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                            | 1.11        | 1.47   |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                           | 0.2         | 0.09   |
| SrO  | 0.02        | 0.05   |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                           | 0.01        | n.d    |
| Pérdida al fuego   | 5.00        | 1.00   |
| Índices de predicción de escorificación y ensuciamiento  |             |        |
| B/A  | 0.28        | 0.56   |
| BAI  | 0.035       | 0.210  |
| Fu   | 3.70        | 8.08   |
| Cl   | 0.63        | 0.69   |
| Estimación de la temperatura de fusión de la ceniza (°C) |             |        |
| DT   | < 1100      | < 1100 |
| HT   | 1200 - 1400 | < 1200 |

b.r. (base recibida); b.s. (base seca)

Como se puede apreciar en la [Tabla II](#), los contenidos de humedad que presentaron los residuos SCS-PUCP y RS-PUCP fueron de 6.27% y 5.81% respectivamente, los cuales se consideran aceptables para procesos de combustión (máximo 12%). Además, son inferiores a los reportados para la paja de trigo y el rastrojo de maíz que están alrededor de 15% [25]. Con relación al contenido de la materia volátil, valores elevados indican una alta inflamabilidad a bajas temperaturas (fácil encendido) y una alta reactividad durante la combustión [25]. La muestra de SCS-PUCP presenta 75.1% de materia volátil que resulta ser un valor elevado y superior a los valores reportados en [12] para la cascarilla de arroz (62.8%), el rastrojo de maíz (73.1%) y la paja de trigo (74.8%), pero inferior al del bagazo (85.5%). La muestra de RS-PUCP presentó 63.65% de materia volátil, siendo un valor similar a los de la cascarilla de arroz y menor que de las otras biomásas reportadas en [12].

La presencia del contenido de carbono fijo en biomásas indica su aptitud para la producción de bio-carbón, así como su idoneidad para su empleo en procesos de gasificación al convertir el carbono en productos gaseosos como H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> [26]. El valor de carbono fijo para SCS-PUCP fue de 15.8% el cual es similar al reportado en [27]. Además, los valores del contenidos de carbono fijo tanto para las muestras de SCS-PUCP y RS-PUCP resultaron inferiores a los valores señalados en [12] para la cascarilla de arroz, el rastrojo de maíz y la paja de trigo, pero superior al del bagazo (12.4%).

El índice ratio de combustión (Fr) es un indicador de estabilidad y duración del proceso de combustión, siendo valores mayores a 2.5 los deseados según [28]. El Fr de la SCS-PUCP fue de 0.21 y el correspondiente al RS-PUCP de 0.24, lo que se traducirá en una combustión con alta generación de llamas, poca producción de char y rápido consumo del combustible. La relación MV/CF de acuerdo a lo mencionado en [26] explica la naturaleza de fases que se producirá el proceso de combustión. En el caso de combustibles con valores de MV/CF < 1 como los lignitos, la primera fase corresponderá a la devolatilización y combustión de volátiles y, la segunda fase que se ocurrirá la combustión sólida del char. En el caso de las biomásas la

relación MV/CF > 1 ambas fases serán gaseosas, en el caso de las muestras de SCS-PUCP y RS-PUCP los valores fueron de 4.75 y 4.09 respectivamente, bastante similares a las observadas en otras biomásas [26].

Las cenizas, material que queda luego de la combustión es factor importante en la evaluación de las biomásas para aplicaciones térmicas. En procesos de combustión el menor contenido de cenizas es deseable pues a mayor porcentaje de cenizas menor poder calorífico, existiendo según [29] una reducción de 0.2 MJ kg<sup>-1</sup> por cada 1% de ceniza. Además, la cantidad de cenizas además influye en el costo de transporte, almacenamiento y manipulación. La muestra de SCS-PUCP posee 9.1% de cenizas, similar a valores reportados en [30] y [27] para hojas de caña de azúcar, y ligeramente superior al del rastrojo de maíz (7.7%), paja de trigo (7.1%), pero elevado comparado con el del bagazo (2.1%) [12]. El porcentaje de cenizas hallado en RS-PUCP fue de 20.73%, superior a lo comúnmente reportado para las pajas pero cercano al que posee la cascarilla de arroz [12]. Por el contenido de cenizas y de humedad la tecnología de combustión de parrilla, lecho fluidizado y lecho fluidizado circulante serían las más adecuadas a aplicarse para ambas biomásas [31].

A partir de la composición de las cenizas se pudo predecir la posibilidad de ocurrencia de problemas de escorificación, ensuciamiento y corrosión [29]. Aplicando los índices predictivos señalados en la [Tabla I](#) se observa que el valor del ratio B/A para la muestra RS-PUCP fue de 0.279 lo cual indica una baja probabilidad de formación de depósitos, mientras que para la SCS-PUCP el valor registrado para este índice fue de 0.559 debido a una mayor presencia de componentes de baja temperatura de fusión en la ceniza y por ello la probabilidad de deposición de cenizas es mayor calificando como de riesgo medio. En el caso del índice BAI su valor fue de 0.21 para la muestra SCS-PUCP y de 0.035 para la muestra RS-PUCP lo cual evidenciaría una probabilidad media de formar aglomerados en el lecho en el caso de operar con sistemas de combustión de tipo lecho fluidizado. Finalmente, con relación al índice de ensuciamiento Fu hallado fue de 8.05 y de 3.7 para la SCS-PUCP y RS-PUCP respectivamente lo que mostraría una tendencia media de la formación de depósitos en las superficies de transferencia de calor en los equipos de combustión como calderas.

Por otro lado, en función a la asociación de óxidos presentes en las cenizas empleando los diagramas ternarios desarrollados en [23] (ver [Fig. 1](#) y [Fig. 2](#)), las cenizas de SCS-PUCP son del tipo S y de acidez media; mientras que las cenizas de la muestra RS-PUCP también son del tipo S pero presentan alta acidez. Por otro lado, las temperaturas DT para las muestras SCS-PUCP y RS-PUCP son menores a 1100 °C y con relación a la temperatura HT en el caso de la SCS-PUCP resulta menor a 1200 °C mientras que para la RS-PUCP se encuentra en el rango de 1200 a 1400 °C lo cual se explica por poseer un mayor contenido de componentes básicos en la ceniza.

Los problemas de escorificación, deposición de cenizas y de corrosión en los equipos de combustión son causados por la liberación de los metales alcalinos Na y K durante la combustión. Además, el contenido de  $KO_2$  influye en la temperatura DT, así en resultados de trabajos de investigación reportados en [12] y [32], se indica que la corteza de maple con 7.03% de  $KO_2$  y la corteza de pino con 7.78% de  $KO_2$ , las DT fueron de 1454°C y de 1230°C respectivamente, mientras que en el caso de la cascarilla de arroz que posee 2.93% de  $KO_2$  la DT alcanzó 1472 °C. Las cenizas de las muestras RS-PUCP y SCS-PUCP, ensayadas en la presente investigación, mostraron un contenido de  $K_2O$  de 11.02% y 12.16% respectivamente, siendo superiores al 7% recomendado en [31] por lo que se espera valores de DT aún menores a los indicados. Según lo señalado en [11] y [33] el lavado con agua permite reducir los contenidos de K, Cl y S, siendo un pre-tratamiento que se recomienda aplicar a las biomásas estudiadas en la presente investigación a fin de mejorar sus propiedades como combustible.

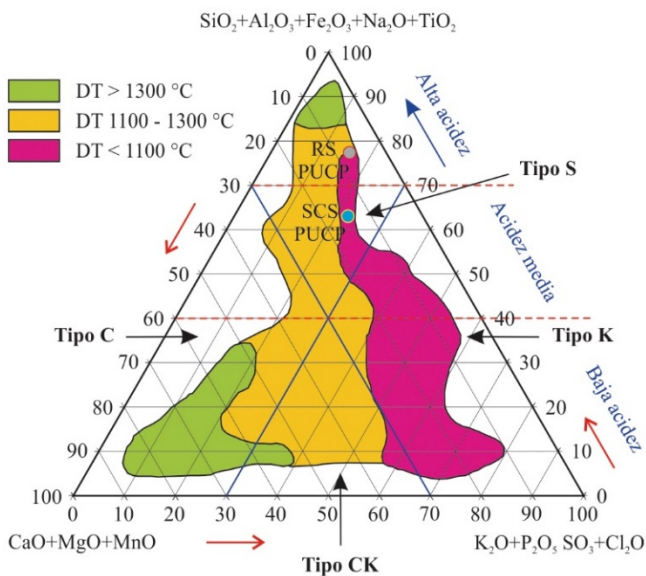


Fig. 1 Diagrama ternario: temperatura de deformación de las cenizas (DT) (Adaptado de Vassilev et al. [23])

Los resultados obtenidos respecto a las temperaturas de fusión de las cenizas DT de las muestras SCS-PUCP y RS-PUCP haciendo uso de los diagramas ternarios presentados en las Fig. 1 y Fig. 2 coinciden con los hallados empleando el diagrama ternario desarrollado en [19] presentado en la Fig. 3 que ubica a ambas cenizas en la zona roja del diagrama lo que implica que las temperaturas DT son inferiores a 1100 °C y por lo tanto el riesgo de presentar problemas de deposición es mayor. Cabe señalar que en ambos casos los valores de temperaturas de fusión hallados son similares a los reportados en [23] para residuos agrícolas herbáceos, categoría a la cual pertenecen las muestras en estudio.

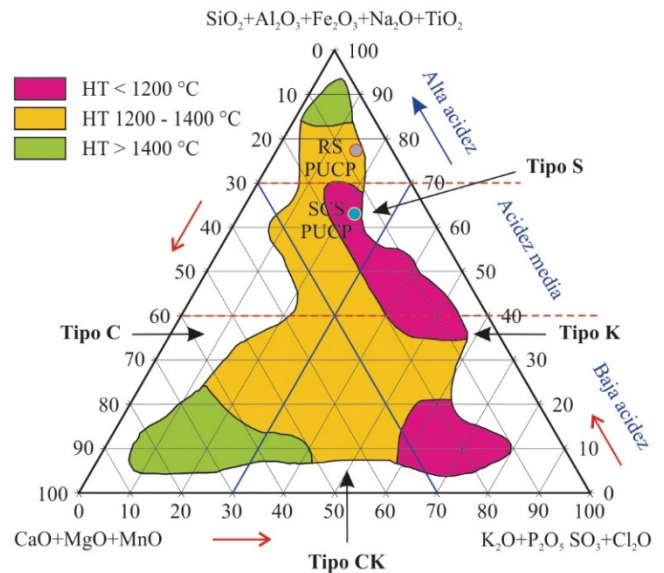


Fig. 2 Diagrama ternario: temperatura hemisférica de las cenizas (HT) (Adaptado de Vassilev et al. [23])

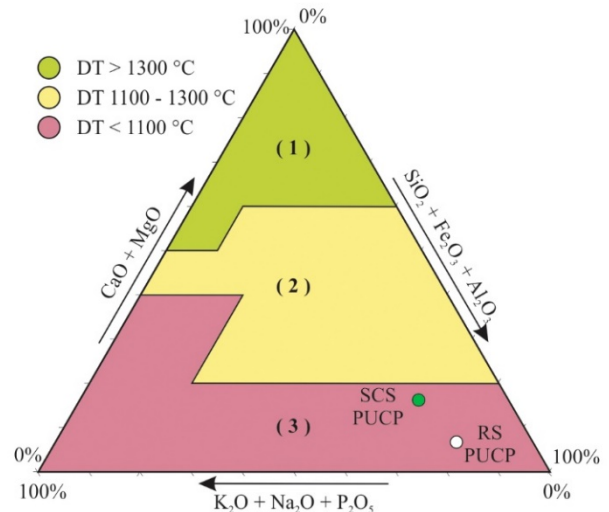


Fig. 3 Diagrama ternario: temperatura hemisférica de las cenizas (Adaptado de Lachman et al. [19])

El poder calorífico representa la cantidad de energía que posee un combustible, las biomásas poseen valores inferiores al de los combustibles fósiles debido a su menor contenido de carbono. En el caso de los residuos SCS-PUCP y RS-PUCP estos poseen un alto poder calorífico de 17.4 MJ kg<sup>-1</sup> y de 14.9 MJ kg<sup>-1</sup> respectivamente, los que resultan superiores al de la paja de trigo de 14.86 MJ kg<sup>-1</sup> reportados en [34] y al correspondiente a la cascarilla de arroz de 13.38 MJ kg<sup>-1</sup> [35], pero inferiores al del bagazo 18.16 MJ kg<sup>-1</sup> reportados en [36].

Con relación a los elementos presentes, los rangos para biomásas lignocelulósicas son 47% < C < 54%, 40% < O < 44% y 5.6% < H < 7% y 0.5% < N < 1% [37]. Los porcentajes de C, H y O de las muestras de SCS-PUCP y RS-PUCP ensayadas se hallan dentro de esos rangos.



La relación H/C y O/C están estrechamente relacionada con el poder calorífico, a menor valor mayor poder calorífico como es el caso de los carbones [38]. Los valores hallados para H/C y O/C en el caso del residuo SCS-PUCP fueron 1.5 y 0.7 respectivamente, mientras que en el caso del residuo RS-PUCP fueron de 1.55 y 0.69 como se muestra en la Tabla II. En base a estos resultados ambos residuos se localizan en la zona de biomasa como se puede apreciar en la Fig. 4 [39]. Además, altos contenidos de C e H son deseados en los subproductos agrícolas en procesos de combustión, mientras que el O es una propiedad no deseada pues no contribuye al poder calorífico.

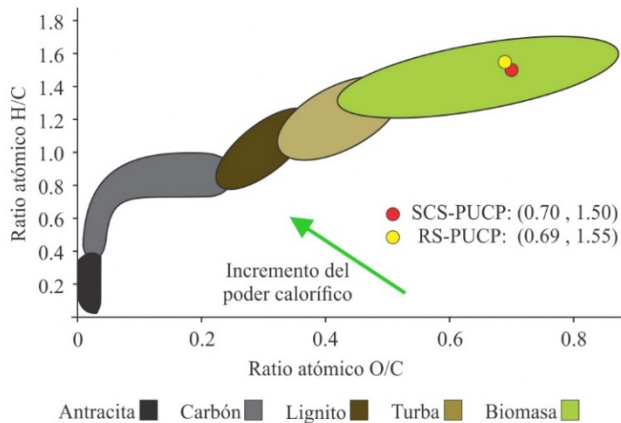


Fig. 4 Diagrama de Van Krevelen (Adaptado de Fu et al. [39])

La densidad aparente (BD) es una propiedad que debe considerarse en las operaciones de manejo, almacenamiento y transporte de las biomásas. Según la referencia [38] se señala que las pajas en el campo posee una BD 20 y 40 kg/m<sup>3</sup>, si se hallan cortadas BD se incrementa hasta 80 kg/m<sup>3</sup> y enfardada alcanza valores entre 110 y 200 kg/m<sup>3</sup>. El valor de BD para SCS indica 17.7 kg/m<sup>3</sup> y RS de 81 kg/m<sup>3</sup>.

El índice CHO indica el grado de oxidación que tiene la biomasa, que para biomasa típicas su valor oscila entre -0,50 y +0,05. El valor de CHO para SCS-PUCP fue de -0.11 y el de RS-PUCP fue de -0.18, lo que denota en ambos caso un bajo nivel de oxidación [20].

El contenido de Cl en las muestras estudiadas fue de 0.69% para SCS-PUCP y de 0.63% para la RS-PUCP, superando en ambos casos los límites recomendados para evitar corrosión en las calderas, emisiones de HCL y de PCDD/F (dioxinas) [31]. Con relación al contenido de S, en el caso de la SCS-PUCP fue de 0.28% mientras que para la RS-PUCP fue de 0.22% superándose los límites recomendados para evitar problemas de corrosión y de emisiones de SO<sub>x</sub> [31]. La posibilidad de corrosión a alta temperatura se corrobora al calcular la relación molar 2S/Cl que fue de 0.89 y 0.76 para la SCS-PUCP y RS-PUCP respectivamente, siendo valores inferiores a los mínimos sugeridos en [21]. Finalmente, el contenido de N hallado en la muestra de SCS-PUCP fue de 0.33% y en la muestra de RS-PUCP de 0.83% superando en ambos casos el valor

recomendado de 0.6% [31] por lo cual se producirán durante la combustión emisiones de NO<sub>x</sub>.

Las emisiones totales estimadas fueron de 1229 gr kg<sup>-1</sup> y de 1396 gr kg<sup>-1</sup> para la RS y la SCS respectivamente, correspondiendo en ambos casos más del 93% a las emisiones de CO<sub>2</sub> lo cual, es favorable pues éstas serán absorbidas durante el proceso de fotosíntesis. Los valores hallados son similares a los reportados para otras biomásas [24].

#### IV CONCLUSIONES

Las biomásas analizadas mostraron alta potencialidad para uso como combustible. Los contenidos de Cl, S, K y Na elevados hallados permiten predecir problemas de escorificación y ensuciamiento y así como la generación de emisiones. Para superar los problemas identificados y potenciar las propiedades térmicas se sugiere aplicar procesos de pre-tratamiento como el lavado con agua lo cual favorecerá la reducción del porcentaje de cenizas, la presencia de metales alcalinos, Cl y S. De esta forma se reducirán los problemas de escorificación ensuciamiento y contribuirá a la reducción de emisiones.

1. El poder calorífico hallado para ambas biomásas es adecuado para uso en combustión y, el contenido de humedad determinado que fue menor al 12%, por lo que no será necesario aplicar un proceso de secado previo a su empleo.
2. El contenido de materia volátil en RS fue de 62.8% y de 75.1% en SCS, lo cual indica que habrá alta reactividad durante la combustión y será fácil su encendido
3. Se halló valores elevados de H/C y O/C para ambos residuos lo cual explica que posean un poder calorífico inferior al correspondiente a los carbones minerales.
4. El reducido Ratio de combustible de 0.24 para RS y de 0.21 para SCS permite afirmar que la combustión será con alta generación de llamas, poca producción de char y rápido consumo de combustible.
5. El porcentaje de cenizas igual 7.9% para SCS es ligeramente superior al de otras biomásas, mientras que el valor hallado en el RS de 20.73% es elevado lo cual debe ser considerado en el diseño del sistema de retiro de cenizas.
6. En ambas biomásas la composición de cenizas mostró altos contenidos de potasio de siendo de 11% para RS y de 12.16% para SCS lo que ocasionarán problemas de deposición de las cenizas en las superficies, problemas de corrosión en los equipos y baja temperatura de fusión de las cenizas
7. El contenido de cloro y azufre en ambos casos superan los límites recomendados. Se predice problemas de corrosión y generación de emisiones de SO<sub>x</sub> y HCl. El contenido de N para ambas biomásas se halla dentro de los rangos sugeridos.
8. Las biomásas analizadas mostraron alta potencialidad para uso como combustible. Los aspectos relacionados con los contenidos de Cl, S, K y Na permiten predecir problemas de escorificación y ensuciamiento. Para



superar los problemas identificados y potenciar las propiedades térmicas se sugiere aplicar procesos de pre-tratamiento como el lavado con agua para lo cual favorecerá en la reducción del porcentaje de cenizas, la presencia de metales alcalinos, Cl y S. De esta forma se reducirán los problemas de escorificación ensuciamiento y contribuirá a la reducción de emisiones.

#### REFERENCIAS

- [1] UNFPA, "Población mundial," 2022. [Online]. Available: <https://www.unfpa.org/es/data/world-population-dashboard>
- [2] Food and Agricultural Organization (FAO), *World Food and Agriculture – Statistical Pocketbook 2023*. Rome, 2023. doi: 10.4060/cc8165en.
- [3] IEA, "World Energy Outlook 2023," Paris, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- [4] F. Kaza, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*, 1st ed. Washington, D. C.: World Bank, 2018. doi: [doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0](https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0).
- [5] P. Friedlingstein *et al.*, "Global Carbon Budget 2023," *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 15, no. 12, pp. 5301–5369, 2023, doi: 10.5194/essd-15-5301-2023.
- [6] D. O. Glushkov, G. S. Nyashina, R. Anand, and P. A. Strizhak, "Composition of gas produced from the direct combustion and pyrolysis of biomass," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 156, pp. 43–56, 2021, doi: 10.1016/j.psep.2021.09.039.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] A. I. Lucas Herguedas, C. del P. Taranco, E. Rodríguez García, and P. Prieto Paniagua, *Biomasa, Biocombustibles y Sostenibilidad*, I. Madrid, 2012. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/260383181\\_Biomasa\\_b\\_iocombustibles\\_y\\_sostenibilidad](https://www.researchgate.net/publication/260383181_Biomasa_b_iocombustibles_y_sostenibilidad)
- [10] X. Ge *et al.*, *Conversion of Lignocellulosic Biomass Into Platform Chemicals for Biobased Polyurethane Application*, 1st ed., vol. 3. Elsevier Inc., 2018. doi: 10.1016/bs.aibe.2018.03.002.
- [11] E. Assureira and M. Assureira, "Energy potential of agricultural residues in Peru for use in thermochemical processes," *Proc. LACCEI Int. Multi-conference Eng. Educ. Technol.*, vol. 2022-July, pp. 1–9, 2022, doi: 10.18687/LACCEI2022.1.1.670.
- [12] 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.
- [13] C. A. M. Moraes *et al.*, "Review of the rice production cycle: By-products and the main applications focusing on rice husk combustion and ash recycling," *Waste Manag. Res.*, vol. 32, no. 11, pp. 1034–1048, 2014, doi: 10.1177/0734242X14557379.
- [14] 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, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.02.057.
- [15] J. Werther, M. Saenger, E. U. Hartge, T. Ogada, and Z. Siagi, "Combustion of agricultural residues," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 26, no. 1, pp. 1–27, 2000, doi: 10.1016/S0360-1285(99)00005-2.
- [16] P. E. Mantelatto, D. Carvalho, M. Regis, and L. Verde, "Sugarcane Straw Processing and Burning Sugarcane Straw Processing and Burning: Identifying the Best Processing Alternatives," *SUCRE - Sugarcane Renew. Electr.*, no. February, 2020.
- [17] E. Assureira and M. Assureira, "SUGARCANE STRAW UPGRADING BY WATER WASHING AND ROASTING FOR ITS USE AS A SOLID BIOFUEL," in *25th European Biomass Conference and Exhibition*, 2017, no. June, pp. 12–15. doi: 10.5071/25thEUBCE2017-3CV.2.23.
- [18] M. R. L. V. Leal, M. V. Galdos, F. V. Scarpore, J. E. A. Seabra, A. Walter, and C. O. F. Oliveira, "Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review," *Biomass and Bioenergy*, vol. 53, pp. 11–19, 2013, doi: 10.1016/j.biombioe.2013.03.007.
- [19] 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 Process. Technol.*, vol. 217, no. August 2020, 2021, doi: 10.1016/j.fuproc.2021.106804.
- [20] J. Cai *et al.*, "Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, no. March, pp. 309–322, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.072.
- [21] P. Sommersacher, T. Brunner, I. Obernberger, and P. Engineering, "Fuel Indexes – a Novel Method for the Evaluation of Relevant 1 Introduction and Objectives 2 Methodological Approach," 2020.
- [22] A. Garcia-Maraver, J. Mata-Sanchez, M. Carpio, and J. A. Perez-Jimenez, "Critical review of predictive coefficients for biomass ash deposition tendency," *J. Energy Inst.*, vol. 90, no. 2, pp. 214–228, 2017, doi: 10.1016/j.joei.2016.02.002.
- [23] S. V. Vassilev, D. Baxter, and C. G. Vassileva, "An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types," *Fuel*, vol. 117, no. PART A, pp. 152–183, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2013.09.024.
- [24] G. Maj, A. Najda, K. Klimek, and S. Balant, "Estimation of energy and emissions properties of waste from various species of mint in the herbal products industry," *Energies*, vol. 13, no. 1, 2019, doi: 10.3390/en13010055.
- [25] N. Hossain, "Characterization of Novel Moss Biomass, Bryum dichotomum Hedw. as Solid Fuel Feedstock," *Bioenergy Res.*, vol. 13, no. 1, pp. 50–60, 2020, doi: 10.1007/s12155-019-10086-7.
- [26] 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.
- [27] K. R. De Palma, N. García-Hernando, M. A. Silva, E. Tomaz, and A. Soria-Verdugo, "Pyrolysis and Combustion Kinetic Study and Complementary Study of Ash Fusibility Behavior of Sugarcane Bagasse, Sugarcane Straw, and Their Pellets - Case Study of Agro-Industrial Residues," *Energy and Fuels*, vol. 33, no. 4, pp. 3227–3238, 2019, doi: 10.1021/acs.energyfuels.8b04288.
- [28] 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.
- [29] G. Zajac, J. Szyszlak-Bargłowicz, W. Gołębowski, and M. Szczepanik, "Chemical characteristics of biomass ashes," *Energies*, vol. 11, no. 11, pp. 1–15, 2018, doi: 10.3390/en11112885.
- [30] J. M. O. Camargo, J. M. Gallego-Ríos, A. M. P. Neto, G. C. Antonio, M. Modesto, and J. T. C. Leite, "Characterization of sugarcane straw and bagasse from dry cleaning system of sugarcane for cogeneration system," *Renew. Energy*, vol. 158, pp. 500–508, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.05.107.
- [31] I. Obernberger, T. Brunner, and G. Bärthaler, "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.
- [32] 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.
- [33] L. Deng, T. Zhang, and D. Che, "Effect of water washing on fuel properties, pyrolysis and combustion characteristics, and ash fusibility of biomass," *Fuel Process. Technol.*, vol. 106, pp. 712–720, 2013, doi: 10.1016/j.fuproc.2012.10.006.
- [34] G. Montero *et al.*, "Higher heating value determination of wheat

- straw from Baja California, Mexico,” *Energy*, vol. 109, pp. 612–619, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.05.011.
- [35] T. D. Akpenpuun, R. A. Salau, A. O. Adebayo, O. M. Adebayo, J. Salawu, and M. Durotoye, “Physical and combustible properties of briquettes produced from a combination of groundnut shell, rice husk, sawdust and wastepaper using starch as a binder,” *J. Appl. Sci. Environ. Manag.*, vol. 24, no. 1, p. 171, 2020, doi: 10.4314/jasem.v24i1.25.
- [36] H. Najafi, A. Golrokh Sani, and M. A. Sobati, “A comparative evaluation on the physicochemical properties of sugarcane residues for thermal conversion processes,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 202, no. December 2022, 2023, doi: 10.1016/j.indcrop.2023.117112.
- [37] C. Telmo, J. Lousada, and N. Moreira, “Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 11, pp. 3808–3815, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.01.021.
- [38] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 1): overview of biomass,” *Bioresour. Technol.*, vol. 83, no. 83, pp. 37–64, 2002.
- [39] J. Fu, G. Allen, S. Weber, S. Q. Turn, and W. Kusch, “Water leaching for improving fuel properties of pongamia Pod: Informing process design,” *Fuel*, vol. 305, no. 2, p. 121480, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121480.