

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ambiente y Desarrollo
Ingeniería en Ambiente y Desarrollo



Proyecto Especial de Graduación
Propuesta para el Aprovechamiento de Residuos de Hoja de
Palma como Biocombustible Sólido para su Valorización y Minimización
en Zamorano, Honduras

Estudiante

Alexandra Nicole Pineda Rivera

Asesores

Victoria Alejandra Cortés Matamoros, D.C.A.

Jacob Rodelvi Vásquez López, M.Sc.

Lourdes Susana Espinal Cabrera, Ing.

Honduras, agosto 2023

Autoridades

SERGIO ANDRÉS RODRÍGUEZ ROYO

Rector

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

ERIKA TENORIO MONCADA

Directora Departamento Ambiente y Desarrollo

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Agradecimientos

El proyecto de graduación presente no se habría realizado sin el apoyo brindado por el personal de La Unidad de Mantenimiento y Recolección de Residuos de La Universidad Zamorano. El cual está conformado por el jefe de la Unidad José Rubén Alvarado y por los integrantes de su equipo: Santos Roberto Zepeda, Bernave Flores Osorio, Roberto Alvares, Julio César Fonseca, José de los Santos Cabrera, Luis Alonzo Martínez y Darwin Alfredo Moreno. Cada uno de ellos demostró su caballerosidad y disposición completa desde el inicio hasta el final de la investigación. Finalmente, se le agradece el Instituto Salvadoreño de Formación Profesional (INSAFORP) por su apoyo en mi carrera profesional y por haberme seleccionado como becario para ser una estudiante de la Escuela Agrícola Panamericana (EAP).

Contenido

Agradecimientos	3
Índice de Cuadros.....	6
Índice de Figuras	7
Índice de Anexos.....	8
Resumen	9
Abstract.....	10
Introducción.....	11
Materiales y Métodos	14
Alcances de la Investigación	14
Localización del Estudio	14
Recolección y Cuantificación de Residuos de Hoja de Palma	14
Visita de Campo	14
Recolección de Información sobre Ciclos de Generación de Residuo	15
Cuantificación del Residuo.....	16
Pesaje de las Hojas de Palma	16
Análisis de Datos	17
Caracterización Físicoquímica y Energética de la Hoja de Palma	17
Preparación de la Muestra.....	17
Homogenización de la Muestra	18
Cálculo de Sólidos Totales, Volátiles y Fijos.....	18
Valorización de la Hoja de Palma.....	19
Prueba de ebullición de agua (WBT).....	19
Cálculo de Eficiencia Térmica.....	21
Análisis de Datos	22

Elaboración de Carbón a Base de Raquis de Palma	22
Evaluación del Comportamiento del Carbón en Tecnología de Cocción de Alimentos.....	24
Costos de Producción de Carbón Vegetal.....	25
Resultados y Discusión.....	27
Cuantificación y Ciclos de Generación de la Hoja de Palma	27
Características Fisicoquímicas y Energéticas del Raquis.....	30
Resultados del WBT para el Raquis de Palma (Leño).....	33
Biocarbón como Alternativa de Valorización.....	35
Evaluación del Carbón a Base de Raquis de Palma.....	35
Costeo de Producción del Carbón de Raquis	37
Conclusiones	40
Recomendaciones.....	41
Referencias.....	42
Anexos.....	46

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Nombre de los Análisis y Métodos Empleados	19
Cuadro 2 Componentes químicos del raquis de palma	30
Cuadro 3 Caracterización fisicoquímica del raquis de palma	30
Cuadro 4 Poder calorífico y contenido de ceniza del raquis de palma.....	31
Cuadro 5 Comparación fisicoquímica de biocombustibles.....	32
Cuadro 6 Comparación de la caracterización en Palma	32
Cuadro 7 Resultados por fases del WBT	33
Cuadro 8 Resultados del Análisis de Varianza por Fases	34
Cuadro 9 Resultados de la Prueba del Carbón.....	36
Cuadro 10 Costo de Producción del Carbón de Raquis semanal	38
Cuadro 11 Comparación de las Marcas de Carbón en bolsas de 3lb en Honduras	39

Índice de Figuras

Figura 1 Mapa de Puntos de Recolección de Residuos Vegetal, Campus Central, Zamorano.....	15
Figura 2 Partes de la Hoja de Palma	17
Figura 3 Fases de la Prueba de Ebullición de Agua (WBT)	20
Figura 4 Montaje para Evaluación WBT.....	21
Figura 5 Diseño del Reactor Piroclítico	24
Figura 6 Diagrama Interno del modelo de estufa Jikokoa Classic.....	24
Figura 7 Composición porcentual de las partes de la Hoja de Palma	27
Figura 8 Producción Mensual del Residuo de Hoja Palma, 2023.....	28
Figura 9 Generación de Biomasa Residual Aprovechable, 2023.....	29
Figura 10 Comportamiento del Carbón de Raquis.....	36
Figura 11 Prueba del Carbón en Estufa.....	37

Índice de Anexos

Anexo A Galería Laguna Seca, Zamorano, 2022.	46
Anexo B Formato para la Cuantificación Residual	48
Anexo C Recolección de Residuos Secos en Zamorano, 2022	49
Anexo D Balanza plataforma digital PREMIER 300 Kg	50
Anexo E Pesaje de Hojas de Palma, 2023	51
Anexo F Pretratamiento (secado) del Raquis	52
Anexo G Equipo de Molienda	53
Anexo H Raquis de Palma Molido	54
Anexo I Mufla Termolyne, F-48055.....	55
Anexo J Resultado de Muestra a 105 °C	56
Anexo K Resultados de Muestra a 600 °C.....	57
Anexo L Resultados de Muestras a 900 °C.....	58
Anexo M Calorímetro Parr 6100	59
Anexo N Estufa EnvirontFit G-3300	60
Anexo O Reactor Pirolítico en Actividad	61
Anexo P Estufa Jikokoa Classic, 2012	62
Anexo Q Prueba en Campo del Carbón	63

Resumen

El objetivo de esta investigación fue proponer una alternativa de aprovechamiento del residuo de hoja de palma, como estrategia de valorización. La investigación se realizó en las instalaciones de la Escuela Agrícola Panamericana, durante la época seca del año. Para la recolección y cuantificación del residuo, se realizaron visitas de campo, estableciendo 18 puntos de recolección. Se determinó el peso promedio, sólidos volátiles, sólidos fijos, carbono fijo, ceniza, humedad y poder calorífico en raquis de hojas de palma seleccionadas al azar. Para determinar el uso de raquis como combustible en estufas se aplicó el protocolo WBT ("Water Boiling Test"). Se evaluó el tiempo de ebullición e incineración y el consumo específico de combustible (SFC) para las fases frío y caliente del protocolo WBT. Se determinó que el peso promedio de una hoja es de 5.39 kg, del cual el 24.2% representa el raquis. Los análisis muestran que el residuo tiene un poder calorífico de 15,472 kJ/kg y que puede ser aprovechable en procesos termoquímicos. Como alternativa de valorización se sometió el combustible a un proceso de pirólisis para la producción de 6 kg de carbón/ 14 kg de raquis. Se estimó que el costo de producción para una bolsa de carbón de 1.36 kg fue de HNL 15.60 sin margen de ganancia, resultando ser una alternativa viable para la valorización.

Palabras clave: Biomasa, calorimetría, hoja, palma, residuo

Abstract

The objective of this research was to propose an alternative use of palm leaf residue as a valorization strategy. The research was conducted at the Escuela Agrícola Panamericana facilities during the dry season of the year. For the collection and quantification of the residue, field visits were made, establishing 18 collection points. The average weight, volatile solids, fixed solids, fixed carbon, ash, moisture, and caloric value were determined in the rachis of randomly selected palm leaves. To determine the use of rachis as fuel in stoves, the WBT (Water Boiling Test) protocol was applied. The boiling and incineration time and the specific fuel consumption (SFC) for the cold and hot phases of the WBT protocol were evaluated. The average weight of a leaf was determined to be 5.39 kg, of which 24.2% represents the rachis. The analyses show that the residue has a calorific value of 15,472 kJ/kg and can be used in thermochemical processes. As a valorization alternative, the fuel was subjected to a pyrolysis process to produce 6 kg of charcoal/ 14 kg of rachis. It was estimated that the production cost for a 1.36 kg bag of charcoal was HNL 15.60 with no profit margin. This is a viable alternative for valorization.

Keywords: Biomass, calorimetry, leaf, palm, residue

Introducción

Según el Informe global de World Bioenergy Association (2021), las tecnologías energéticas renovables como la biomasa, la geotérmica y solar térmicas, han duplicado la producción en generación de calor en los últimos 19 años. La biomasa y una fracción mínima de tecnologías renovables geotérmicas y solar térmicas, han producido el 97% del calor renovable. El reporte estadístico global de bioenergía del 2021 estimó que la generación energética por biomasa aportó 56.9 “exajoule” (EJ) a nivel mundial. De este aporte, el 85% de las fuentes de biomasa fueron de aserrín, pellets de madera y fuentes de biomasa tradicional (WBA, 2021).

La Agencia Internacional de la Energía (2016), menciona que la biomasa representará la fuente primaria de energía para el 2050, con aportes hasta de 139 EJ a nivel global. La biomasa residual es aquella generada como consecuencia de un proceso productivo o debido a las explotaciones agrícolas, forestales o ganaderas (Patiño, 2014). La biomasa residual agrícola como el bagazo de caña, la paja de cereal, casulla de arroz, girasoles y entre otros, son algunos ejemplos. El aprovechamiento de la biomasa con fines energético, debe ser evaluado a través de las características fisicoquímicas del material y las variables tecnológicas a utilizar (Budí Orduña, 2016).

Para la conversión de la biomasa seca a energía, es necesario aplicar procesos de transformación al material (P. Kumar et al., 2020); estos procesos se clasifican en cuatro grupos: la conversión biológica, mecánica, química y termoquímica. Algunas tecnologías termoquímicas son: torrefacción, carbonización, gasificación, pirólisis y combustión (J Arauzo et al., 2014a). Algunos residuos agrícolas empleados en procesos termoquímicos son: fibra de cocotero, palma de aceite, bagazo de caña, cebada y cascarilla de arroz, que se caracterizan por su alto poder calorífico (Núñez y Williams, 2012).

Diversas investigaciones ponen a prueba la eficiencia de combustibles provenientes de residuos agrícola aplicados en tecnologías industriales. En 2017, se realizó una investigación sobre el aprovechamiento del residuo de caña de azúcar para calderas bagaceras en Argentina. Como

resultados se obtuvo que la mezcla entre el bagazo y residuo agrícola de cosecha de caña (RAC); con proporciones de 75% de bagazo y 25% de RAC se logró una eficiencia térmica de 71,6% en la caldera. La producción de vapor aumentó en un 21%, hasta lograr un ahorro de 43% de bagazo para producir la misma cantidad ofertada en la caldera de gas natural (Golato et al., 2017).

De acuerdo con Nogués et al. (2010), los biocombustibles sólidos pueden contener entre el 70 y 90% de compuestos volátiles, de 10 al 30% de carbono fijo y entre 1 a 20% de cenizas. El contenido de humedad de la biomasa varía debido a la composición de la materia. La cantidad de agua presente en la biomasa define la tecnología de conversión ideal; los procesos termoquímicos han reportado mayor eficiencia, cuando los porcentajes de humedad son inferiores al 50%.

Estudios realizados muestran los rangos promedios de las propiedades de combustión de la biomasa de palma de aceite. Se evaluaron las propiedades de tres partes de la palma (tusa, fibra y cuesco), siendo el contenido de humedad correspondiente a 67, 37.09 y 12%; el contenido de cenizas desde 4.60, 6.10 y 3.00; el contenido de materia volátil desde 83.45 a 87.04%. También, se midió el poder calorífico, siendo estos valores de 18.88 MJ/kg para la tusa, 19.00 MJ/kg para la fibra y 20.09 MJ/kg del cuesco (Barrera et al., 2018).

En Arabia Saudita, se ha registrado un promedio de 20 kg de hoja residual por árbol de palma datilera al año. La generación de biomasa de palma en Arabia supera la cifra de 200,000 T anuales (Faiad et al., 2022). Jonoobi et al. (2019), realizó un cuadro resumen de características fisicoquímicas de la palma evaluando los foliolos, raquis y la combinación de ambos, con los cuales realizó una comparación entre materiales de madera y el carbón bituminoso. Como resultados se obtuvo que presentaban una humedad menor del 20% en material volátil (MV), la madera es de 82%, los foliolos con 78.1% y el raquis con 55.3%. El poder calorífico con valores similares, con poca diferencia entre la madera (18.6 MJ/kg) y los foliolos (17.9 MJ/kg) (Mehdi et al., 2019).

A nivel mundial existen una explotación masiva de distintas especies de palma y los productos de esta. Algunas de estas especies comerciales son: *Cocos nucifera* (Palma cocotera), *Elaeis guineensis*

(Palma Africana) y *Phoenix dactylifera* (Palma datilera). La producción mundial de palma datilera para el 2021 en millones de toneladas métricas (TM), fueron de 9.66 millones TM sobre 8.4 millones de TM en 2017 (Statista, 2023). De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas (s.f) alrededor de 2,800 millones de personas dependen de la leña, el carbón vegetal, el estiércol para cocinar y calentar alimentos.

La Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, en Honduras, cuenta con abundancia de palmas, situadas en los jardines del campus central. Una de las problemáticas del campus, es la generación de residuos de jardinería, conformado por gran mayoría por las hojas de palma. La universidad, carece de un plan de manejo para este material. Actualmente, se realizó la recolección, traslado y depósito en el vertedero seco denominado Laguna Seca.

Como resultado del método de disposición, las hojas de palma aportan un 10% de las emisiones de gas metano (CH_4) cuantificadas en el inventario GEI de Zamorano, con un estimado de 560 Ton $\text{CO}_{2\text{eq}}$ para el año 2020. Conocer las composiciones del material residual, nos permite brindar soluciones para el manejo o el aprovechamiento de diferentes residuos. Es por ello por lo que esta investigación tiene como objetivo general: Proponer una alternativa de aprovechamiento del residuo de hoja de Palma como biocombustible sólido para su valorización y minimización en Zamorano, Honduras.

Para esto, se plantean los siguientes objetivos específicos: A) Estimar la cantidad y la disponibilidad estacional de biomasa residual de las hojas de palma recolectadas por la unidad de mantenimiento de Zamorano durante el primer trimestre del año 2023. B) Proponer alternativas de valorización de hoja de palma considerando sus características energéticas y tecnologías disponibles para su aprovechamiento a escala doméstica de los prototipos propuestos y C) Determinar los costos de producción de carbón vegetal a partir del raquis de palma, como alternativa de valorización del residuo.

Materiales y Métodos

Alcances de la Investigación

La investigación es de tipo cuantitativa exploratoria con un alcance descriptivo, debido a la poca información presentada sobre el aprovechamiento del raquis como combustible sólido. Durante el primer trimestre del año 2023, se realizó la cuantificación de la hoja de palma residual, lo que permitió proyectar una generación residual para el primer semestre del año. Así mismo, se realizaron evaluaciones con procesos termoquímicos que permitieron conocer el comportamiento del combustible a evaluar mediante la prueba de ebullición de agua (WBT por sus siglas en inglés).

Localización del Estudio

El estudio se desarrolló en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, ubicada a 37 km al este de Tegucigalpa en el municipio de San Antonio de Oriente, en el departamento de Francisco Morazán, Honduras. Se encuentra a 14° N a 800 msnm (Escuela Agrícola Panamericana [EAP], 1985). La cuantificación de la biomasa residual se realizó en La Unidad de Manejo Forestal y Valor agregado de Madera donde se ubicó el punto de recepción de las hojas de palma. Las pruebas con el prototipo de biocombustible sólido se realizaron en el Centro de Evaluación de Estufas Mejoradas (CEEM), ubicado espacialmente en la misma unidad. Finalmente, los análisis de caracterización fisicoquímica y energética de la hoja de palma se realizaron en el Laboratorio de Bioenergía del Departamento de Ambiente y Desarrollo.

Recolección y Cuantificación de Residuos de Hoja de Palma

Visita de Campo

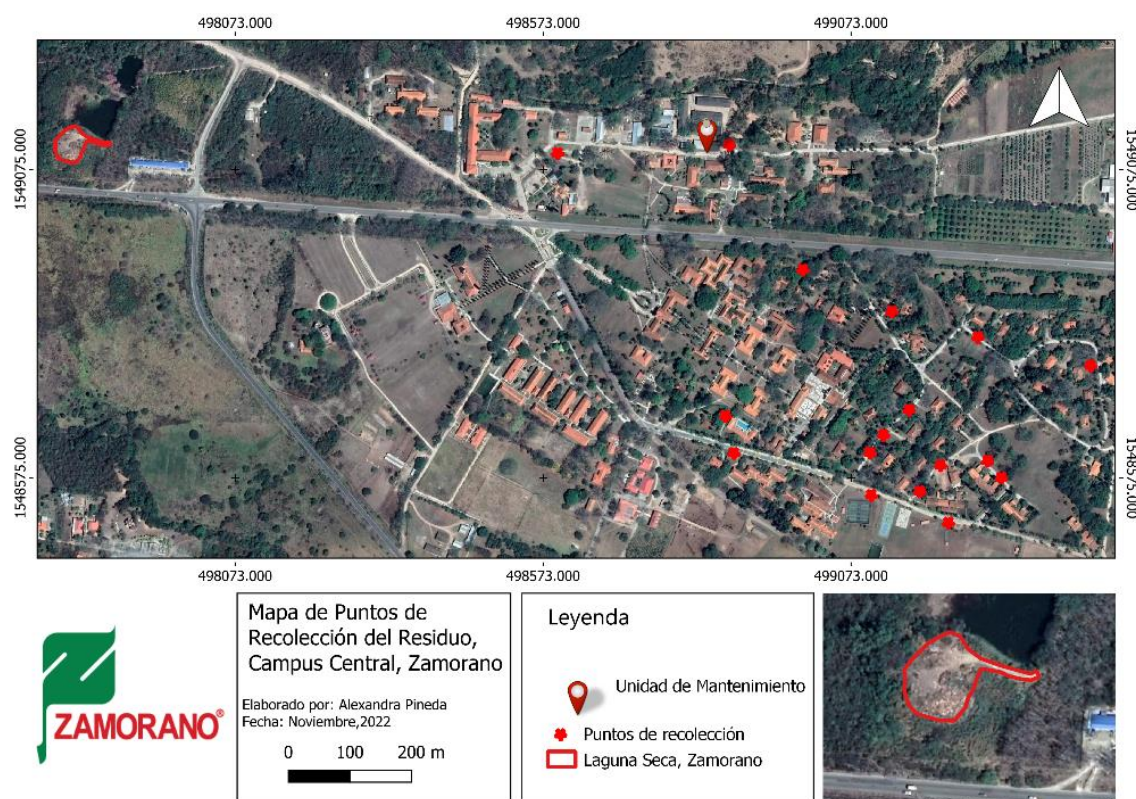
Se organizaron espacios de diálogo con el jefe y trabajadores de la unidad de Mantenimiento de la Universidad Zamorano, con el fin de introducir y explicar el propósito de la investigación para solicitar su colaboración. Su apoyo fue primordial en el transporte desde el lugar de generación del residuo hasta el sitio de estudio. Se realizó un recorrido por el campus central para el mapeo de los puntos de recolección de residuos vegetales. También, se desarrolló un muestreo piloto para

identificar el orden de actividades, tiempos de recolección y otros detalles pertinentes para la toma de datos en lugar y tiempo establecido.

Como resultado del recorrido, se determinaron 18 puntos de recolección de residuos vegetales, donde las hojas de palma y otros productos de poda son depositados diariamente para su traslado y disposición en el vertedero seco conocido como Laguna Seca de Zamorano (Anexo A). A continuación, se muestra el mapa con los puntos de recolección en el campus central de Zamorano (Figura 1).

Figura 1

Mapa de Puntos de Recolección de Residuos Vegetal, Campus Central, Zamorano



Nota. Elaboración propia.

Recolección de Información sobre Ciclos de Generación de Residuo

Se recopiló información por medio de una entrevista informal, conformada por preguntas abiertas, la cual se dirigió al coordinador general de la unidad de mantenimiento y recolección de residuos. El fin de la entrevista era para conocer sobre el manejo brindado a las hojas de palma, en la

cual se obtuvo poca información debido a que no existe datos previos, solamente por observación activa.

Cuantificación del Residuo

Se seleccionó un punto de recepción para los residuos de hoja de palma, localizado en la Unidad de Manejo Forestal de Zamorano. Se diseñó un formato donde se detalla la cantidad y tamaño de hojas; pequeñas (< 2m) y grandes (> 2m), además de las condiciones climáticas (Anexo B). Se llevó un registro de estos parámetros en los primeros meses del presente año, con el fin de determinar el ciclo de generación de hojas (semanal y mensual). También, se tomó en cuenta las precipitaciones del sitio de estudio, para observar si existe una relación entre la estacionalidad y ciclos de generación.

Pesaje de las Hojas de Palma

La cuantificación de las hojas de palma recolectadas, se realizó registrando la masa total en kilogramos por semana (kg/semana) (Alwared, 2016; Sebola et al., 2014). Para la estimación del peso medio de la hoja, se realizó un muestreo aleatorio de 10 unidades cada semana durante 12 semanas. La hoja de palma fue cortada en tres partes; vaina, raquis, ápice y foliolos, para el registro del peso individual que en su totalidad equivale al peso de la hoja (Figura 2). Para esta actividad se utilizó la balanza de plataforma digital marca "PREMIER®" con capacidad de 300 kg (Anexo D). Para la cuantificación semanal se utilizó la Ecuación 1.

$$\text{kg de hoja semanal} = \text{Chg} \times \text{Pp} \quad [1]$$

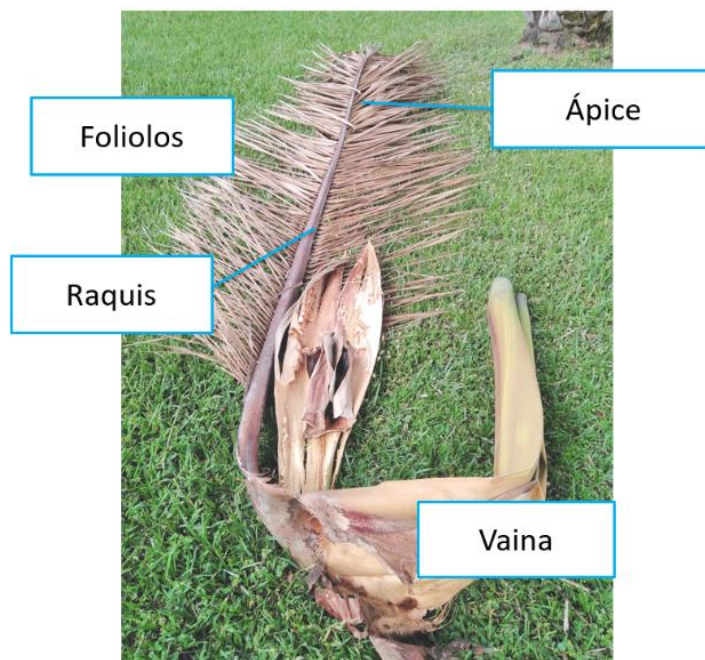
En donde:

Pp = Peso promedio de la hoja en kg.

Chg = Cantidad de Hoja Generada (número entero)

Figura 2

Partes de la Hoja de Palma



Nota. Elaboración propia.

Análisis de Datos

Los prototipos de combustible sólido evaluados en esta investigación se elaboraron a partir del raquis exclusivamente. La mayoría de las investigaciones relacionada evalúan los foliolos y vaina de la palma, dejando de lado el uso del raquis (Ben Salem et al., 2021). Se escogió el raquis debido a la facilidad de manipulación por su estructura y densidad (Anexo F). Para el análisis de los datos de la sección, se utilizó estadística descriptiva con el “software Microsoft Excel Office 365®”, versión 16.

Caracterización Físicoquímica y Energética de la Hoja de Palma

Preparación de la Muestra

Se tomaron los raquis previamente separados de la vaina y foliolos, a los cuales se redujo el porcentaje de humedad, debido a que esto afectaría la combustión del material durante los ensayos aplicados (S. Kumar et al., 2021). Como unidad experimental se utilizaron 50 raquis de palma, que fueron expuestos a la luz solar aproximadamente de 24 a 48 horas, volteando las caras para tener una homogeneidad de secado. Posteriormente, se realizaron cortes de una longitud de 40 cm para facilitar

el manejo y la preparación para las pruebas de WBT, de combustible sólido (carbón) y demás pruebas de laboratorio.

Para la prueba de ebullición de agua (WBT), se utilizaron 16/50 unidades experimentales. Con la ayuda de un medidor de humedad CEM DT-219[®], se verificaron valores menores al 12% para luego realizar cortes con las medidas de 40 cm × 2.5 cm × 1.5 cm. Dichos tamaños fueron establecidos por el protocolo WBT versión 4.3.2. Los cortes fueron realizados manualmente, en donde se procuró eliminar la corteza de los lados de la estaca (Anexo F).

Para poder ser sometidos a análisis a nivel de laboratorio, el tamaño de las partículas de la muestra, deben ser menores a 2 mm (Landaverde, 2018). Para reducir el tamaño de las partículas se utilizó la máquina de molienda eléctrica DEK "heavy Duty Equipment" (Anexo G). Se realizaron tres muestras compuestas de 5 kg cada una, a las cuales se les asignaron códigos de identificación: muestra 1 (23122), muestra 2 (23123) y muestra 3 (23124).

Homogenización de la Muestra

Para la homogenización de la muestra, se utilizó una lona azul (puede utilizarse alguna manta) extendida en el suelo donde se depositó cada muestra y fue mezclada para hacerla representativa (Anexo H). Con ayuda de un cucharón de acero inoxidable, se tomó partículas finas y gruesas que se depositaron en un contenedor por muestra. A pesar de la molienda, el tamaño de la muestra aún no era el adecuado, por lo que se utilizaron tijeras de manos para obtener el tamaño adecuado para los análisis. El proceso se repitió con las tres muestras, las cuales se almacenaron en bolsas rotuladas con la fecha de muestreo, la cantidad y el nombre de quién realizó la recolección.

Cálculo de Sólidos Totales, Volátiles y Fijos

En el Cuadro 1, se detallan los análisis a utilizados con su respectivo método y una descripción breve sobre el significado de cada uno. Los análisis fueron realizados por los métodos estandarizados a nivel internacional (ASTM por sus siglas en inglés), donde los procesos y cálculos son detallados a profundidad. Para este caso se utilizó principalmente del protocolo 2540 G de sólidos, conformado

por sólidos totales, sólidos volátiles, sólidos y carbono fijos y demás secciones para el resto de los parámetros. Para el análisis de los resultados se aplicó estadística descriptiva, utilizando el “software” de hoja de cálculo “Microsoft Excel Office 365®”, versión 16.

Cuadro 1

Nombre de los Análisis y Métodos Empleados

Análisis	Método	Referencia
Humedad	Humedad en la muestra de análisis de carbón y coque	ASTM D 3173-00
Sólidos Volátiles	Análisis para la eliminación del agua dejando el peso seco	2540G
Sólidos Fijos	Análisis para determinar los sólidos después de la calcinación	2540G
Cenizas	Análisis para determinar los residuos de la incineración	D3172
Carbono Fijo	Análisis proximal estándar para carbón y coque con procedimientos instrumentales	D3174
Poder Calorífico	Método de prueba estándar para el poder calorífico bruto del carbón y el coque	ASTM5865 modificado por Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano en base a Obeng et al. (2020)

Valorización de la Hoja de Palma

Prueba de ebullición de agua (WBT)

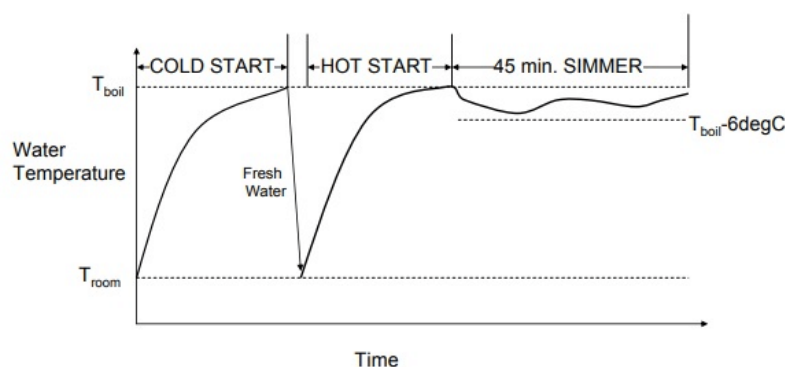
“Water Boiling Test” (WBT) es un protocolo estandarizado para evaluar la eficiencia de estufas mejoradas y las emisiones generadas durante el proceso de combustión, realizadas bajo condiciones controladas. El protocolo permite evaluar el consumo del combustible, consumo de agua, tiempo de ebullición y monitoreo de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) y partículas PM_{2.5} (Global Alliance for Clean Cookstoves, 2013).

El proceso del ensayo consta de tres fases; la primera conocida como fase de alta potencia de inicio en frío, en donde la estufa se encuentra a temperatura ambiente. La segunda fase de alta potencia de inicio en caliente, que se realiza al finalizar la primera fase, mientras la estufa se encuentra con calor almacenado. La tercera fase o fase de hervir a fuego lento, brinda la cantidad de combustible utilizado para hervir agua por debajo del punto de ebullición durante 45 minutos (Figura 3). Las

evaluaciones tomaron lugar en el Centro de Evaluación de Estufas Mejoradas (CEEM), Zamorano. Para conocer más acerca de las especificaciones y condiciones, se utilizó el protocolo WBT versión 4.2.3.

Figura 3

Fases de la Prueba de Ebullición de Agua (WBT)



Nota. Tomado de MacCarty, (2007).

El criterio de aceptación de los resultados de las pruebas WBT fue la obtención de un coeficiente de variación (CV) menor de 20%. Para esta investigación se utilizó la fase en frío y caliente, ya que el objetivo fue observar la tasa de consumo de combustible, tasa de incineración, el tiempo de ebullición y la eficiencia térmica. La tercera fase no se incluyó dentro del alcance de esta investigación ya que no se está evaluando la eficiencia de la tecnología sino la viabilidad del raquis como combustible sólido.

Las pruebas se iniciaron utilizando la estufa modelo “Envirofit” HM-4000 con plancha lisa. No obstante, se presentaron inconvenientes para el inicio de la combustión del material, debido a que el área de alimentación de combustible era reducida, limitando el ingreso de oxígeno. Se realizaron dos pruebas en este modelo, en las cuales los ensayos fueron suspendidos y descartados debido a los resultados desfavorables.

Se realizó el cambio de la estufa de plancha por la de fuego directo modelo “Envirofit” G-3300 (Figura 4), la cual es de tipo portátil de ignición directa. Se utilizaron muestras de raquis de palma con humedad inferior al 12%; la operación de la estufa se realizó con cinco leños de raquis de palma. Para el proceso de ignición se utilizaron astillas y viruta de pino; equipo de protección personal necesario.

Después de colocar 2.5 L de agua en la olla de metal sobre G-3300 (Anexo M), se insertaron los sensores de temperatura dentro de la olla para el monitoreo del alcance del punto de ebullición. Luego de completar el proceso, se tomaron los pesajes de los materiales al final de la fase fría e inicio de la fase caliente; el proceso fue el mismo para la siguiente fase (Morazán, 2021). Este ensayo se realizó con un mínimo de tres repeticiones y los datos, se ingresaron en el formato de WBT modificado. Para la medición de humedad de los leños de raquis, se utilizó el medidor de humedad CEM DT-219®.

Figura 4

Montaje para Evaluación WBT



Cálculo de Eficiencia Térmica

El parámetro de mayor importancia del WBT es la eficiencia térmica (EF), que es definido como la fracción de calor transferido en un cuerpo receptor (olla) a partir de la energía producida por un combustible. Los resultados son expresados en términos porcentuales, debido a que se trata de una medida adimensional. Para calcular este parámetro se utilizó la Ecuación 2.

$$h_c = \frac{[4,186 \cdot \sum(P_{sji} - P_s) - (T_{jcf} - T_{jci})] + 2,226 \cdot W_{cv}}{f_{cd} \cdot LHV} \quad [2]$$

Donde:

h_c = eficiencia térmica

P_{jci} = peso inicial de la olla con agua

P_j = peso de olla

T_{jcf} = T° final de la olla con agua

T_{jci} = T° inicial de la olla con agua

W_{cv} = cantidad Agua evaporada

f_{cd} = cantidad de leña seca consumida

LHV = poder calorífico inferior

Análisis de Datos

Se realizó un análisis estadístico inferencial, aplicando un análisis de varianza para verificar la existencia de diferencias significativas entre la fase de arranque en frío y arranque en caliente, con un nivel de confianza del 95%. Siendo las variables de respuesta: tiempo de ebullición, tasa de incineración, eficiencia térmica y consumo específico de combustible. Para el análisis estadístico se utilizó el programa estadístico "InfoStat®", versión 2020d.

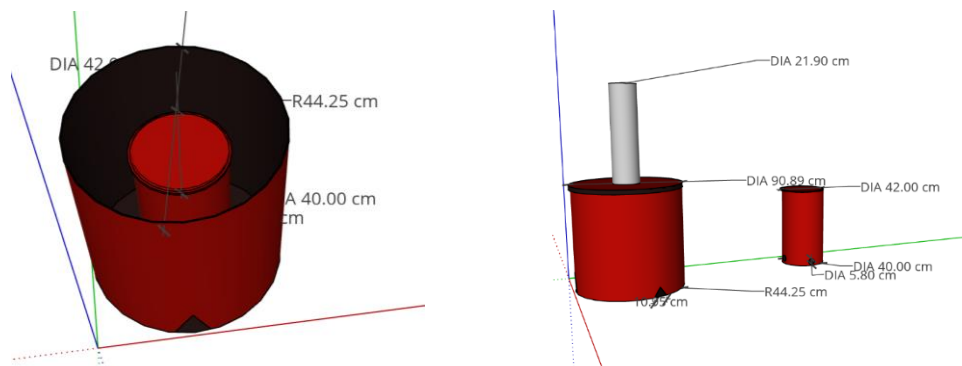
Elaboración de Carbón a Base de Raquis de Palma

Dada los resultados de la caracterización fisicoquímica y la prueba WBT, se optó por utilizar la biomasa de raquis de palma como material potencial para la producción de carbón vegetal, como estrategia de valorización de este residuo. Consecuentemente se construyó el reactor pirolítico con materiales reutilizables, encontrados en la unidad de reciclaje de Zamorano. Posterior a la obtención del biocombustible sólido, se realizó una prueba estandarizada para observar el comportamiento del combustible en términos de eficiencia en una estufa que opera con biomasa o carbón.

El biocarbón o carbón vegetal, se define como un material sólido obtenido a partir de la conversión termoquímica de biomasa bajo una atmósfera limitada de oxígeno. Cuenta con tres procesos principales; la etapa inicial es la eliminación de agua contenida en la biomasa, seguida por la generación del carbón primario, producto de la volatilización de compuestos orgánicos. La etapa final en donde ocurre la descomposición del biocarbón, formando sólidos residuales con altas cantidades de carbono fijo (Munar-Flores et al., 2022). Investigaciones afirman la efectividad del uso residual de hojas de palma para la producción de biocarbón (Faiad et al., 2022; Jonoobi et al., 2019).

Para realizar el carbón de raquis de palma, se construyó un reactor pirolítico de ignición interna a base de materiales reutilizables. El diseño consistió en dos barriles de metal. La materia prima es colocada en el barril interior (de carga) el cuál debe calentarse a una temperatura superior de 300 °C. Mientras tanto, el barril exterior es cargado por trozos de madera distribuidos con la mayor uniformidad posible, los cuales serán la fuente de ignición del sistema. La combustión empieza en la parte superior del barril exterior, lo que da lugar a la volatilización entre los dos barriles que es alimentada por las entradas inferiores del barril (Figura 5).

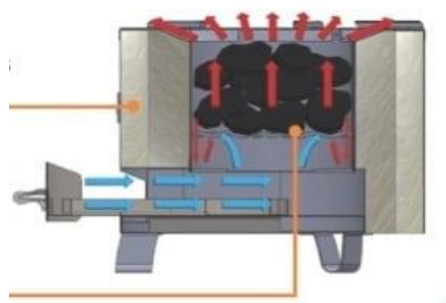
Mientras ocurren las reacciones en el barril del exterior, el calor generado es transmitido por conducción, encerrando el calor en el barril interno. Los agujeros en la base del barril de menor tamaño, permite el paso del oxígeno limitado, dando lugar a las condiciones necesarias para pirólisis. La vida útil del reactor es de 30 usos, en los cuales cada tanda fue de 14 kg de raquis; se cargó con leña residual de aserradero para el funcionamiento del reactor. Se registraron los pesos del material antes y después del uso del reactor, para conocer la eficiencia de la producción del carbón. Posteriormente se esperó 4 h de ignición; con una eficiencia del 42% del reactor se obtuvieron 6 kg de carbón.

Figura 5*Diseño del Reactor Piroclítico*

Nota: Elaborado por Romero (2023), SketchUp®.

Evaluación del Comportamiento del Carbón en Tecnología de Cocción de Alimentos

Se utilizó equipo de la empresa “Burn” originaria de Kenya que se encarga de la comercialización de estufas mejoradas para biomasa y carbón. El modelo de estufa empleado fue “Jikokoa Classic” para combustión de carbón (Anexo O). Esta estufa incluye una rejilla de cromo, el canal de entrada que gracias a la geometría permite el ingreso de un volumen de aire equilibrado, contiene material aislante ligero que permite contener el calor en la cámara de combustión, mientras que el exterior facilita la manipulación (Engineering For Change, s.f). Se realizaron tres repeticiones de una prueba estandarizada.

Figura 6*Diagrama Interno del modelo de estufa “Jikokoa Classic”*

Nota. “Engineering for Change”, 2015.

La prueba estandarizada se basó en la metodología del WBT. Para el montaje se utilizó una olla de metal con 2.5 L a una temperatura menor a 25 °C. Se registraron los pesos de la olla con agua, el peso de la estufa y la caja de astillas. También, se midieron los siguientes parámetros al inicio y al final de la evaluación: la temperatura del agua (°C), la astilla utilizada (kg), el peso del carbón de raquis de palma (kg), el peso de la ceniza (kg), el tiempo de ebullición (min) y el tiempo de duración del ensayo (min). Los datos fueron representados mediante gráficos que muestran la relación entre tiempo y temperatura en intervalos de cinco minutos. Asimismo, se calculó el tiempo promedio que tarda en llegar al punto de ebullición en las repeticiones.

Costos de Producción de Carbón Vegetal

Para la estimación de los costos de producción, se determinaron los costos fijos y costos variables a partir del método de costeo basado en la producción. Como costos fijos se incluyó la mano de obra y el transporte del residuo; en los costos variables se tomaron en cuenta los costos de fabricación del reactor, el uso por lote del reactor, bolsas de papel, los metros cúbicos de leña empleados para el funcionamiento del reactor y el costo de electricidad por el uso de la sierra para el corte del raquis. La unidad funcional para el costeo fue de 1 kg de carbón como producto final.

El Acuerdo Ejecutivo STSS 308-2022 de Honduras, establece los salarios mínimos de acuerdo con el área económica y la cantidad de empleados de una empresa. Para el cálculo de sueldo semanal, se utilizó el salario de HNL 9,915.61 de la categoría de agricultura, silvicultura, caza y pesca (Dentos Muñoz, 2023); cabe mencionar que en el costo de producción solo se tomó a un trabajador para todas las actividades del proceso de elaboración de carbón.

La cotización y la consulta de precios fueron necesarias para el cálculo de los costos, es por ello por lo que se expresan en lempiras hondureños (HNL) y en dólares americanos (USD) para una mejor interpretación. Los costos por trasportes se estimaron con un supuesto de cuatro viajes por semana, por un valor de USD 15 (HNL 369.75), dicho valor representa el costo del flete dentro de Zamorano.

Otro factor de importancia fue el cálculo de bolsas de carbón producidas por tanda, tomando en cuenta la vida útil del reactor. Cada tanda tiene una capacidad de 14 kg de biomasa en crudo; la eficiencia del reactor es del 42%, obteniendo así 6 kg de carbón, en consecuente cuatro bolsas de 3 lb cada una. El reactor cuenta con una vida útil para 30 repeticiones, el cual fue distribuido entre el costo de fabricación, obteniendo así el valor por cada tanda.

Para determinar el consumo de energía, se registraron las especificaciones de la sierra circular Makita de 12 pulgadas a un voltaje de 110 con 4,000 rpm, con ella se determinó la potencia de equipo, para poder calcular los kWh utilizados. Por otro lado, el cálculo para la compra de leña de rechazo en metros cúbicos se realizó calculando la diferencia entre el volumen del barril externo e interno del reactor, conociendo así el volumen necesitado para alimentar el reactor.

Los precios de las equipos y herramientas eléctricas, fue consultado en el catálogo de la empresa Larach y Cia. Por otro lado, para la comparación de precios de mercado de carbón en Honduras, se realizó una búsqueda en los catálogos de “Walmart®”, Paiz® y La Colonia® (red de supermercados de Honduras) con el fin de conocer los precios de mercados de una bolsa de carbón de 3 lb para su respectiva comparación con el costo de producción.

Resultados y Discusión

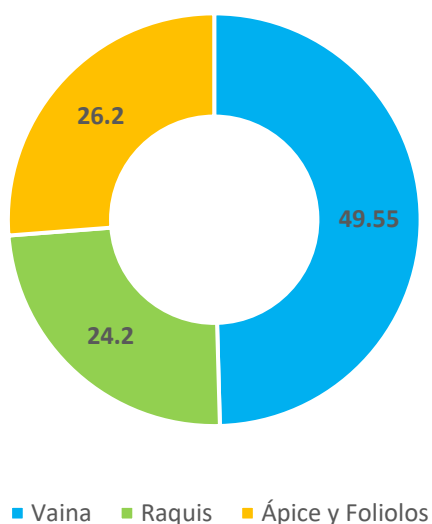
Cuantificación y Ciclos de Generación de la Hoja de Palma

La cuantificación y pesaje de los residuos sólidos generados por actividades productivas o naturales son acciones primordiales y una herramienta base para la toma de decisiones en términos de disposición, tratamiento o valorización. Se calculó el peso promedio de las hojas muestreadas, dando un resultado de 5.39 kg por hoja. A partir de este valor, se determinó la proporción de raquis, vaina y ápice más foliolo (Figura 7).

El peso promedio de las hojas, concuerda con lo estimado por Cayón (1999), en el que reporta que el peso promedio de una hoja de palma es de 5 - 8 kg aproximadamente. La separación de la hoja en tres partes permitió determinar que la mayor distribución del peso es abarcada por la vaina, seguido por los foliolos con el ápice y en menor proporción el raquis. Por medio del resultado del peso promedio de cada parte, se calculó la distribución del peso de forma porcentual.

Figura 7

Composición porcentual de las partes de la Hoja de Palma

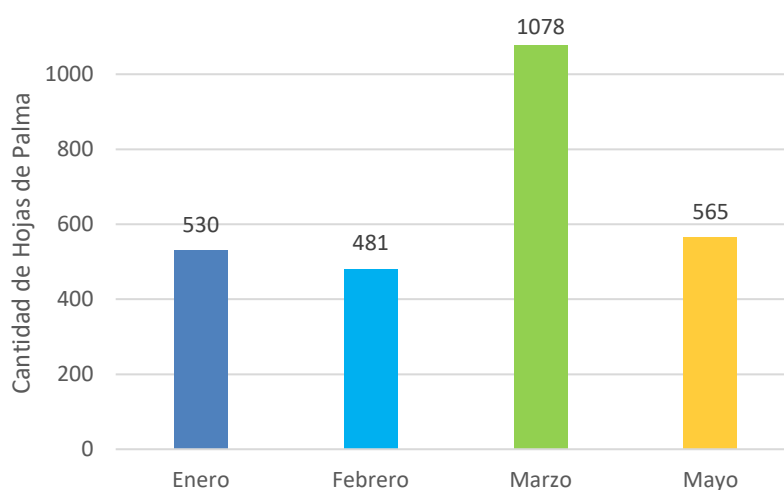


Nota. Elaboración propia, 2023.

Acorde con la cuantificación registrada en el primer trimestre del año, se obtuvieron como resultado las cantidades de hojas residuales por mes. Siendo marzo el mes con mayor cantidad de hojas registradas, con un total de 1,078 y con menor cantidad mayo, con un total de 565 hojas. Se evidencia un comportamiento ascendente del residuo en el primer trimestre, que desciende en el mes de mayo (Figura 8). Lo anterior, se debe al comportamiento de los ciclos de generación que se ve influenciado por la estacionalidad. En el primer trimestre la generación residual fue mayor debido a que el ciclo de la hoja (caída de hojas e inicio de floración) y la ocurrencia de precipitaciones inusuales fue simultánea.

Figura 8

Producción Mensual del Residuo de Hoja Palma, 2023



Nota. Elaboración propia.

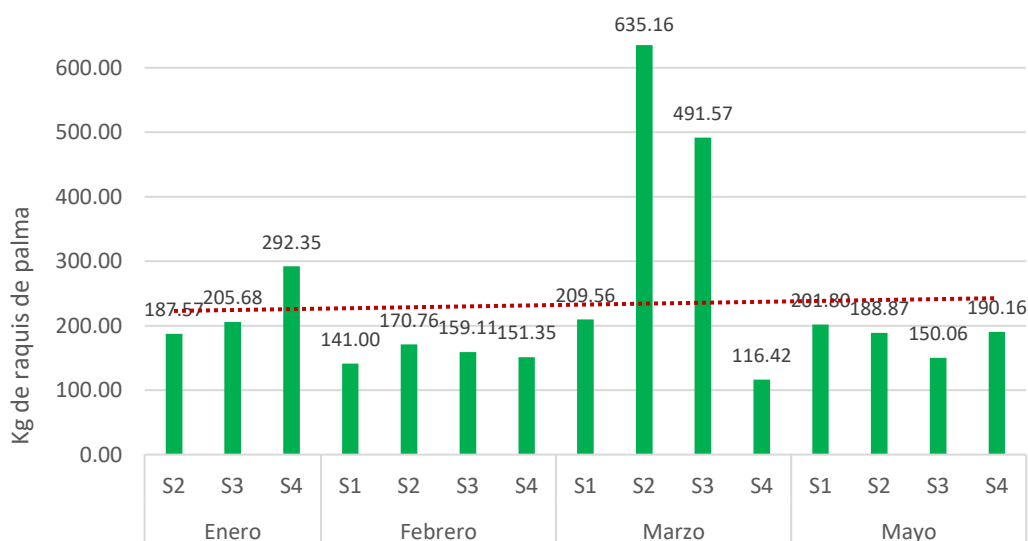
Retomando los resultados de generación en marzo, los días con mayor cantidad de hojas generados fueron el 14, 15 y 21, con valor diario de 133, 120 y 125 hojas respectivamente. Según las precipitaciones de los días mencionados, se obtuvieron valores de 2.1, 0.1 y 2.8 mm correspondientes. Si se comparan los datos de precipitación diarios durante esos días con la precipitación media del mes de marzo, que fue de 0.005 mm; se justifica que la cantidad de hojas generadas fue influenciada por las lluvias presenciadas en la etapa morfológica de madurez alta en las hojas.

Cayón (1999) en su investigación sobre la fisiología y el desarrollo de la palma expresó que “...durante la estación seca se producen las hojas que luego, al comenzar lluvias, se expanden y crecen normalmente.”. Lo mencionado anteriormente concuerda con el comportamiento observado de la palma, donde la caída de hojas fue mayor durante el tiempo de floración de la palma, ocurrido en la estación seca.

Los kilogramos de raquis generados semanalmente fueron determinados a partir del peso de las hojas de palma. Lo que permitió calcular la cantidad de biomasa aprovechable para fines energéticos. En la Figura 9, se muestran las cantidades (kg) de raquis generados por semana. Igualmente, el mes con mayor cifra fue marzo, con un total de 1,452.71 kg de raquis; seguido por el mes de enero con 685.61 kg y con menor cantidad el mes de febrero con 622.22 kg.

Figura 9

Generación de Biomasa Residual Aprovechable, 2023



Nota. Elaboración propia, 2023.

Existe una tendencia en la cantidad de kilogramos de raquis de palma generados semanalmente, es decir, que durante el primer trimestre del año se obtienen ciclos menor o igual a 200 kg de biomasa aprovechable por semana. Para el caso de la biomasa residual seca del raquis de palma en el campus de Zamorano, se generan 3,098.17 kg de biomasa de raquis al semestre con potencial energético desaprovechado. Con esta cantidad se pueden producir 47,936,063.54 kilo-

Joules (kJ) de energía de energía, lo cual es equivalente a utilizar 1,051 L de combustible Diesel (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 1991).

Características Físicoquímicas y Energéticas del Raquis

El raquis es materia orgánica densa y fibrosa, que puede medir desde los tres a ocho metros de longitud. Diversos estudios hablan sobre la composición del raquis de palma, que está formado por celulosa, hemicelulosa y lignina. Existen investigaciones principalmente en las especies de palma datilera y africana donde detallan la cantidad porcentual de los componentes del raquis. Como resultados se obtiene que hay mayor contenido de lignina en la palma datilera que en la palma africana (Cuadro 2). La lignina posee grandes propiedades energéticas similar a la del combustibles sólidos como el carbón mineral, lo que quiere decir que pueden ser aprovechadas para generación de calor (Torres et al., 2015).

Cuadro 2

Componentes químicos del raquis de palma

Especie	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Referencia
<i>Elaeis guineensis</i>	34.4	26.7	12.5	(Bayona et al., 2021)
<i>Phoenix dactylifera</i>	38.3	28.2	22.5	(Faiad et al., 2022)

Las propiedades físicoquímicas de la biomasa son fundamentales para determinar el tipo de tecnología adecuada para su aprovechamiento. La composición de la biomasa en base seca está constituida entre 42-50% de carbono, de 4 a 7% de hidrogeno y del 42-50% de oxígeno, conteniendo en cantidades mínimas nitrógeno y azufre. En el Cuadro 3, se muestran los resultados de los análisis físicoquímicos de la biomasa del raquis de palma, para ello se realizaron tres muestras, cada una con tres repeticiones. Se indican los valores promedios obtenidos.

Cuadro 3

Caracterización físicoquímica del raquis de palma

Repeticiones	SV (%)	Ceniza (%)	CF (%)	Humedad (%)
R1	83.592	7.171	0.433	8.8031

Repetición	SV (%)	Ceniza (%)	CF (%)	Humedad (%)
R2	87.020	7.350	0.253	5.3776
R3	83.579	9.531	0.444	6.4459
Promedio	84.7	8.018	0.377	6.8755

Nota. sólidos volátiles (SV), sólidos fijos (SF), carbono fijo (CF) y ceniza (Cenz).

Según J. Arauzo et al. (2014b) menciona que los rangos aptos de las propiedades fisicoquímicas para un biocombustible. Los investigadores describen que la caracterización debe de contener altos porcentajes de materia volátil (70-80%), entre 0.5 a 5% de cenizas y un contenido de humedad inferior al 12% y un rango de 15 a 22 MJ/kg de poder calorífico. Las propiedades de la biomasa de raquis muestran como resultado que contiene un 84.7% de material volátil, un 0.38 de carbono fijo (CF), una humedad del 6.8% y 8.02% de ceniza. Se puede observar que los resultados de la caracterización se encuentran dentro de los rangos establecidos para un biocombustible.

Sin embargo, el contenido de ceniza es superior al 5%, siendo este el valor recomendable, debido a que la ceniza contiene propiedades corrosivas al estar en grandes cantidades por su contenido de dióxido de silicio (SiO_2) y óxido de calcio (CaO) (Barrera et al., 2018). También, la cantidad de sólidos volátiles son superiores al 80%; lo que significa que el 84% de los sólidos del raquis se volatilizan en la incineración, dejando los residuos fijos (ASTM International, 2002). Por tanto, el raquis de palma es un material altamente volátil que puede ser empleado como biocombustible en procesos termoquímicos.

En el siguiente cuadro se muestran los resultados obtenidos para el poder calorífico, reportando el numero de ensayos realizados (Cuadro 4). Se determinó que el poder calorífico (PC) del raquis de palma es en promedio este residuo puede ser utilizado como biocombustible (J. Arauzo et al. y (Barrera et al.).

Cuadro 4

Poder calorífico y contenido de ceniza del raquis de palma

Repetición	Peso (g)	Cal/g	J/g
R1	0.4538	3682.98	15419.90
R2	0.5103	3779.33	15823.30

Repetición	Peso (g)	cal/g	J/g
R3	0.5775	3624.23	15173.93

Nota. (g) es gramos, (cal) calorías, (J) Joules.

Se realizó una comparación de los resultados obtenidos de la caracterización de la biomasa del raquis de palma con la composición de pino (*Pinus oocarpa*) como biocombustible, seleccionado por su disponibilidad en el Centro de Estufas Mejoradas. En el Cuadro 5, se observa que el aserrín de pino tiene un 77.7% de SV, mientras que el raquis presenta un 91% de SV. La cantidad de ceniza para el aserrín de pino es de 0.43% con 16.94% de CF, mientras que para el combustible evaluado tiene un 8.02% de cantidad de ceniza y 76.09% de CF.

Cuadro 5

Comparación fisicoquímica de biocombustibles

Combustible	SV (%)	Cen (%)	CF (%)	Hum (%)	Referencia
Aserrín de pino	77.7	0.34	16.94		(Pérez et al., 2022)
Raquis palma	84.7	8.02	0.38	6.88	(elaboración propia)

Dados los resultados de la caracterización de la biomasa evaluada y las características describir por (J. Arauzo et al., 2014b); (Nogués et al., 2010), se obtuvo cifras dentro de los rangos recomendados para los ensayos de material volátil, carbono fijo y humedad. A pesar de sobrepasar por tres puntos porcentuales de la cantidad de ceniza se puede utilizar como material apto para procesos termoquímicos. Finalmente, se realizó un cuadro comparativo entre los resultados obtenidos de la caracterización que muestran las cifras de los parámetros en la palma datilera y las características de la fibra de la hoja de palma (Cuadro 6).

Cuadro 6

Comparación de la caracterización en Palma

Biomasa	Humedad (%)	MV (%)	Ceniza (%)	CF (%)	LHV (kJ/kg)	Referencia
Palma Datilera	17.7	55.3	19.2	7.8	10,900	(Faiad et al., 2022)
Palma Datilera	12.3	69	10.2	8.4	13,050	(Jonoobi et al., 2019)
Fibra de hoja	5	78.1	11.7	5.2	---	(Alward, 2016)
Raquis de palma	6.8	84.7	8.02	0.37	15,472	(elaboración propia)

La caracterización de la palma datilera y la del raquis de palma, muestran resultados favorables para su uso como biomasa. El MV del raquis es superior al de la palma datilera; por otro lado, se muestra que el carbono fijo del raquis es de 0.34% del carbono del material no es aprovechable. Asimismo, se muestra que el poder calorífico neto (LHV por sus siglas en inglés) es superior a los resultados de los estudios realizados en la palma datilera. Por tanto, se confirma el potencial del raquis de palma como biocombustible.

Resultados del WBT para el Raquis de Palma (Leño)

El punto de ebullición de un líquido es la temperatura a la que su presión de vapor es igual a la presión del gas sobre él (atmósfera). Por ello, los valores cambian por la diferencia de presión dependiendo de la altura del lugar (Purdue University, s.f); en el trópico el punto de ebullición es de 96.1 °C. En la fase de arranque en frío, la estufa tardó en promedio 12.4 minutos para alcanzar el punto de ebullición del agua, mientras que en la fase de arranque caliente el tiempo fue de 10.4 minutos.

En la fase de arranque en frío, la estufa G-3,300 logró una eficiencia de 21.5%, mientras que en la fase de arranque en caliente la eficiencia se mantuvo en 21.6% (Cuadro 7). Al ser una estufa de fuego directo, es susceptible a mayores pérdidas de calor, especialmente por las paredes de la estufa, sino también por las pérdidas de calor proveniente de la cámara de combustión.

Cuadro 7

Resultados por fases del WBT

Fase	Métrica	Unidad	R1	R2	R3	R4	Promedio
Arranque en Frío ("Cold start")	Tiempo de ebullición	°C	12	13	12	10	12.4
	Tasa de incineración	g/min	36.83	22.92	26.83	31.40	28.50
	Eficiencia térmica	%	16.94	23.57	22.51	22.30	21.53
	Consumo específico de combustible	g/L	52.8	35.2	43.20	32.80	40.96
Arranque en Caliente ("Hot start")	Tiempo de ebullición	°C	12	12	9	9	10.4
	Tasa de incineración	g/min	32.33	29.17	46.67	46.67	35.05

Fase	Métrica	Unidad	R1	R2	R3	R4	Promedio
	Eficiencia térmica	%	19.57	20.86	17.11	17.37	21.63
	Consumo específico de combustible	g/L	56	43.2	40	40.80	41.92

Nota. R es el número de repetición.

La tasa de incineración en la fase de arranque en frío, fue de 28.5 g/min, cifra que aumentó para el arranque en caliente con un promedio de 35.1 g/min. Es, decir que el parametro indica, la cantidad de combustible consumido en un minuto. En la fase caliente el consumo fue mayor, debido a que existe una ventaja con el calor almacenado en la cámara de combustión, favoreciendo el inicio de transferencia de calor a la olla, siendo ligeramente más eficiente que en la primera fase. Al igual que el consumo específico de combustible (SFC) se define como el promedio entre los resultados de la fase fría y caliente. El SFC fue de 41.44 g/L.

En el siguiente cuadro, se encuentran expresados los resultados del análisis de varianza (ANDEVA) que indica la significancia de los resultados. Se muestran las medidas de tendencia central y dispersión para cada variable de respuesta (tiempo de ebullición, tasa de incineración, eficiencia térmica y consumo específico del combustible (Cuadro 8).

Cuadro 8

Resultados del Análisis de Varianza por Fases

Variable respuesta	SS	CV	valor-p
T. ebullición	3.13	13.61	0.2872
T. Incineración	169.68	22.91	0.1463
Eficiencia Térmica (hc)	13.55	12.29	0.1854
SFC	32	19.27	0.5202

Nota. error estándar (SS), Coeficiente de variación (CV), Probabilidad (valor-p/ 0.005). Elaboración propia.

Los resultados de la ANDEVA aplicada, muestran que no existe una diferencia significativa entre las fases, debido a que la $p > 0.005$. Las variables respuestas, tampoco muestran diferencias significativas. Mientras tanto, el CV por variable respuesta son inferiores al 20%, exepcto para la tasa de incineración (22.9%), dando a entender que hay una mayor dispersión de los datos.

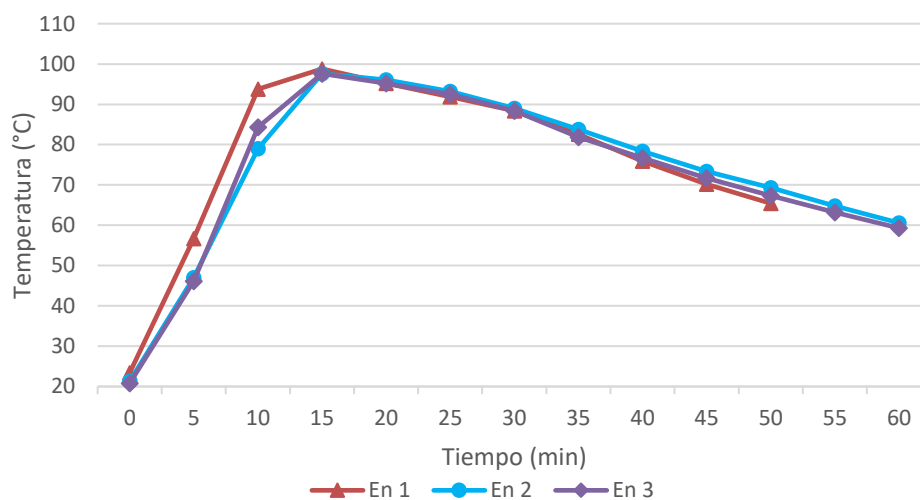
El estudio realizado por León (2017), evaluó el desempeño de estufas mejoradas operadas por diferentes biocombustibles, reporta que no existió diferencia significativa entre el uso del pino y el raquis de palma de coco, por lo tanto las eficiencias entre combustibles son similares. En las conclusiones del estudio, se menciona que la palma genera altas emisiones de CO₂, CO y PM_{2.5}. Lo mencionado anteriormente pudo deberse al tipo de tecnología de cocción utilizada, que consistió en una estufa modelo HM-4000®.

Biocarbón como Alternativa de Valorización

El estudio realizado por Ben Salem et al. (2021), evaluó el potencial del biochar de hoja de palma datilera como una solución al cambio climático por medio de la captura de CO₂ en diferentes temperaturas en un proceso pirolítico. Las temperaturas evaluadas fueron a los 300, 400, 500 y 600 °C. Como resultados se determinó que la mayor captura de carbono fue en proceso pirolítico de 600 °C, con una absorción total de carbono del 25%, es decir que equivale a 0.25 kg CO₂/kg de hoja de palma.

Evaluación del Carbón a Base de Raquis de Palma

En las tres repeticiones realizadas se mostraron comportamiento con altas similitudes entre ellas. Al inicio de las evaluaciones, la temperatura inicial del agua estaba entre los 20-23 °C; al paso de cinco minutos, se registraron temperaturas próximas a los 50 °C y al paso de 10 minutos la temperatura estaba entre 80-85 °C que están próximos al alcance del punto de ebullición (96.1 °C).

Figura 10*Comportamiento del Carbón de Raquis de Palma*

Nota. Elaboración propia, 2023.

Los datos obtenidos muestran que el punto de ebullición se alcanza en 12.9 min. Se realizó el cálculo de la eficiencia térmica del producto, obteniendo resultados de 17.04%. Al igual que la prueba WBT, se muestran los resultados de cada variable que conforman la métrica (Cuadro 9).

Cuadro 9*Resultados de la Prueba del Carbón*

Métrica	Unidades	R1	R2	R3
Tiempo de Ebullición	min	12.3	13.4	13
Tasa de Incineración	g/min	12.2	11.6	12.2
Eficiencia Térmica	%	17.19	17.01	16.91
Consumo Específico del combustible	g/L	60	62.4	63.2

Las especificaciones del equipo HM-4000®, afirman que la eficiencia térmica de la estufa es de 42.44 (L'Orange, 2014). Los resultados obtenidos, indican, que el tiempo que tarda el combustible en llegar al punto de ebullición es de 13 minutos en promedio. Por otro lado, la tasa de incineración del carbón es de 12 g/min; el carbón presenta una eficiencia térmica de 17% y un consumo específico de 61.8 g/L.

Durante el proceso de investigación sobre el comportamiento del carbón comercial, no se encontraron gráficos que muestren la relación de las variables de tiempo y temperatura. Sin embargo, existen algunas investigaciones que hablan de la caracterización del carbón vegetal proveniente de distintos materiales. Se encontró que una de las características de un buen carbón vegetal, es contener al menos un 75% de CF (FAO, 1983; Sis-Pitán, 2017), lo que cumple con el resultado descrito en la caracterización con 76% de CF.

Además, algunos estudios reportan que el promedio de la eficiencia del carbón vegetal es de 15 a 16% (Sistema de la Integración Centroamericana [SICA], 2017), lo cual es congruente con las características del carbón vegetal producido. Sin embargo, es importante mencionar que la eficiencia depende de la tecnología aplicada y su operación (Figura 11).

Figura 11

Prueba del Carbón en Estufa



Nota. Fotografía propia, 2023.

Costeo de Producción del Carbón de Raquis

La transformación de la biomasa a biocarbón se evaluó como estrategia de valorización del residuo debido al mercado comercial existente del producto. En el 2021, se comercializaron USD 1.52 miles de millones de carbón de leña. A nivel mundial Indonesia y China son los mayores exportadores de carbón (The Observatory of Economic Complexity [OEC], 2021). El informe de la FAO, a nivel de América Latina y el Caribe menciona que se produjo cerca de 8.9 millones de T de carbón en 2015

(FAO, 2017). En términos energéticos, este combustible aún es utilizado como una de las principales fuentes energéticas.

Con base a la proyección de disponibilidad residual por semana con una tendencia de 200 kg de hojas, de esta fracción obtenemos 440 lb de residuo a la semana. Es decir, con 200 kg de hojas, se obtienen 146 bolsas de carbón (3 lb o 1.36 kg) por el residuo semanal. Es necesario recordar que la vida útil de reactor pirolítico es de 30 usos, generando durante su vida útil una producción de 132 bolsas de carbón; por tanda se tiene una producción de dos bolsas de 1.36 kg. En el Cuadro 10, se muestra los resultados de los costos fijos y costos variables que determinan el costo de producción.

Cuadro 10

Costo de Producción del Carbón de Raquis semanal

Costos	Unidades	Cantidad	Costos HNL	HNL	USD
<u>Costos Fijos</u>					
Trasporte	Flete	4.00	370.50	1,482.00	60.49
Mano de obra	Trabajador	1.00	330.52	330.52	13.49
Sumatoria				1,812.52	73.98
<u>Costos Variables</u>					
Costo por uso del reactor	tanda		122.50	122.50	5.00
Bolsas de papel	unidad	146.00	0.95	138.70	5.66
Leña	M ³	1.00	197.71	197.71	8.07
Consumo de Energía Eléctrica					
Makita	KW/h	2.00	2.93	5.86	0.24
Sumatoria				464.77	18.97
Total				2,277.29	92.95

Para obtener el resultado del precio por unidad de producción, se distribuyeron los costos entre las 146 bolsas, obteniendo como resultado HNL 15.60 por cada bolsa de 3 lb. El estudio de Marciaga (2015), muestra las diferentes marcas de carbón en el mercado hondureño, en donde el precio comercial promedio es de HNL 70 la bolsa. Se realizó una comparación del costo de producción vs a los precios de venta del carbón en cadenas de supermercados de Honduras.

Los precios fueron revisados en línea y se observó que los costos de producción de una bolsa de carbón vegetal a base de raquis de palma se encuentran por debajo de los precios de venta. Esto representa una oportunidad para la generación de ingresos a través de la venta directa, sin embargo, para este análisis no están considerados los costos de comercialización, promoción, infraestructura y transporte de importación (Cuadro 11).

Cuadro 11

Comparación de las Marcas de Carbón en bolsas de 3lb en Honduras

Puesto de venta	Marca	Precio HNL
"Walmart"	La Chispa	60
	El Venado	68
La colonia	La Chispa	69.9
	El Venado	71.9
Paiz	La Chispa	60
	El Venado	68.75
Puesto de ventas	Biocarbón de raquis	15.60

Nota. Elaboración propia, 2023.

La generación de valor de un residuo, como el caso de la palma, puede representar una oportunidad de generar utilidades, debido a que el costo de producción por bolsa fue de HNL 15.60. Esto representa una oportunidad de inversión, que debe ser analizada mediante un estudio de factibilidad. Esta estrategia de valorización puede representar una oportunidad para Zamorano, brindando una propuesta ante la problemática de falta de gestión del residuo de hojas de palma.

Conclusiones

En el primer trimestre del año 2023, se generó un total de 3,098 kg de biomasa aprovechable, siendo marzo el mes con mayor disponibilidad del residuo. Esto debido a procesos estacionales que coincidieron con la floración de la palma donde se incrementa la pérdida de hojas en la planta. Así mismo la generación residual disminuyó en el mes de mayo, con la presencia de nuevos brotes de hojas.

Los resultados de la caracterización de la biomasa y la prueba de ebullición de agua (WBT), indican que el residuo de raquis de palma cuenta con características favorables para su uso en quema directa como combustibles o su transformación en carbón vegetal, obteniendo desempeños comparables a la leña de pino al operar tecnologías de cocción en cuanto a material volátil, humedad, ceniza y carbono fijo.

El producto con mayor potencial de comercialización y densidad energética generado a partir de esta biomasa es el carbón vegetal. El costo de producción para una bolsa de 1.36 kg fue de HNL 15.60 por bolsa de carbón, lo que representa una alternativa de valorización y gestión del residuo para Zamorano.

Recomendaciones

Realizar la cuantificación del residuo de la hoja de palma en la estación húmeda, con el fin de poder realizar proyecciones de los ciclos de generación del residuo para un año. Para poder determinar la cantidad de gas metano producido por la descomposición de la materia orgánica y observar el aporte en la huella de carbono de la universidad Zamorano.

Desarrollar un estudio de factibilidad para evaluar la viabilidad económica del aprovechamiento del residuo de palma como biocarbón para la Escuela Agrícola Panamericana.

Construir una tecnología termoquímica con mayor capacidad y eficiencia para la elaboración de carbón vegetal, como la construcción de distintos modelos de hornos elaborado con materiales diferentes.

Realizar la caracterización fisicoquímica del carbón del raquis de palma y utilizar el equipo LEMS para determinar la emisión de gases producidas en el proceso de combustión.

Evaluar el potencial de la vaina, foliolos y ápice de la hoja de palma para su transformación y valorización por medio de productos derivados de dichas partes para fines agrícolas o energéticos.

Referencias

- Agencia Internacional de la Energía. (2016). *Mobilising sustainable bioenergy supply chains: Opportunities for agriculture*. IEA Bioenergy. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-981-15-0410-5.pdf>
- Alwared, A. I. (2016). *Effect of Date Palm Leaf Fiber on Mechanical Properties of Concrete*. 23. <https://jaaru.org/index.php/auisseng/article/view/94/69>
- Arauzo, J [J], Bimbela, F [F], Ábrego, J [J], Sánchez, J. L [J L] y Gonzalo, A [A] (2014a). Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa. *Boletín Del Grupo Español Del Carbón*(33), 2–6. <https://digital.csic.es/handle/10261/108763>
- Arauzo, J [J.], Bimbela, F [F.], Ábrego, J [J.], Sánchez, J. L [J. L.] y Gonzalo, A [A.]. (2014b). *Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa* (Vol. 33). <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-981-15-0410-5.pdf>
- ASTM International. (2002). *Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke: D 3172 - 89* (23ª ed.).
- Barrera, J., Ramírez, N. y García, J [Jesús] (2018). Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite. *PALMAS*, 39(4), 26–28. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12709#:~:text=La%20combusti%C3%B3n%20de%20la%20biomasa,de%20un%20sistema%20de%20combusti%C3%B3n>
- Bayona, C., García, J [Juan], Gacha, J. y Ricuarte, H. (2021). Hacia el aprovechamiento energético de los raquis de palma en calderas de biomasa. *PALMAS*, 44(1), 51–64. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/13806/13611>
- Ben Salem, I., El Gamal, M., Sharma, M., Hameedi, S. y Howari, F. M. (2021). Utilization of the UAE date palm leaf biochar in carbon dioxide capture and sequestration processes. *Journal of Environmental Management*, 299, 113644. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113644>
- Budí Orduña, A. (2016). *Estimación del potencial energético de la biomasa residual agrícola y análisis de aprovechamiento en los municipios de la comarca del Alto Palancia* [, Universitat Jaume I]. repositori.uji.es. https://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/165971/TFM_2016_BudiOrdu%c3%b1aAlicia.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cayón, D. (1999). Apuntes sobre fisiología del crecimiento y desarrollo de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.). *PALMAS*, 20(3), 45–47. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/710>
- Dentos Muñoz. (2023). *Honduras: aumento a salarios mínimos para 2023*. <https://www.dentonsmunoz.com/es/insights/alerts/2023/february/27/honduras-minimum-wage-increase-for-2023>
- Engineering For Change. (s.f). *Burn Jikokoa*. <https://www.engineeringforchange.org/solutions/product/burn-jikokoa/>
- Escuela Agrícola Panamericana. (1985). *Informe Anual*. Honduras.

- Faiad, A., Alsmari, M. y Ahmed, M. (2022). Date Palm Tree Waste Recycling: Treatment and Processing for Engineering Applications: Biodiversity Linked to Animal Welfare. *Sustainability*, 14(3), 2–5. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/3/1134>
- FAO. (1983). *Métodos simples para fabricar carbón vegetal*. Estudio FAO: Montes: Vol. 41. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- FAO. (2017). *América Latina y el Caribe es la segunda mayor productora de carbón a nivel mundial | FAO en Honduras | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. <https://www.fao.org/honduras/noticias/detail-events/es/c/853949/>
- Global Alliance for Clean Cookstoves (2013). *The Water Boiling Test*. USA. <https://cleancooking.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf>
- Golato, M. A., Feijóo, E. A., Franck Colombres, F. J., Paz, D. y Cárdenas, G. J. (2017). Estudio preliminar del aprovechamiento de los residuos agrícolas de cosecha de la caña de azúcar como combustible adicional para calderas bahaceras de Tucumán. *Revista Industrial Y Agrícola De Tucumán*, 94(2). http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-30182017000200003
- Jonoobi, M., Shafie, M., Shirmohammadli, Y. y Ashori, A. (2019). *A Review on Date Palm Tree: Properties, Characterization and Its Potential Applications*. https://file.techscience.com/uploads/attached/file/20191113/20191113072035_49004.pdf
- Kumar, P., Bharathiraja, B., Kataki, R. y Moholkar, V. S. (2020). *Biomass Valorization to Bioenergy*. Energy, Environment, and Sustainability (Aninash Kumar Agarwal). Springer Singapore. http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/2997/Perez_Gonzalez_G_DC_Edafologia_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=16
<https://doi.org/10.1007/978-981-15-0410-5>
- Kumar, S., Harijan, K., Jeguirim, M., Soomro, M. I., Nixon, J. D. y Uqaili, M. A. (2021). Assessment of energy potential of date palm residues in Khairpur district, Pakistan. *Biofuels*, 12(10), 1267–1274. <https://doi.org/10.1080/17597269.2019.1610599>
- Landaverde, A. (2018). *Potencial energético de la biomasa residual de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano*. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/5c40b4e5-490b-4747-b71a-c7249e67d3f3/content>
- León, M. A. (2017). *Evaluación del desempeño de estufas mejoradas portátiles operadas con combustibles sólidos alternativos* [Tesis de pregrado]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>
- L'Orange, C. (2014). *Clean Cooking Catalog - Functional Demo*. Clean Cooking Alliance. http://catalog.cleancookstoves.org/stove_details.html?stove_id=stove_B7VQFL2
- MacCarty, N. (2007). *The water boiling test*. <https://cleancooking.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf>
- Marciaga, I. (2015). *Estudio de mercado para carbón vegetal en Tegucigalpa, Honduras* [, Zamorano]. Library catalog. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/5f8e1433-ecf5-435d-89b7-1b3a5dc59914/content>

- Mehdi, J., Masoud, S., Younes, S., Alireza, A., Hamid, H. y Tizazu, M. (2019). A Review on Date Palm Tree: Properties, Characterization and Its Potential Applications. *Journal of Renewable Materials*, 7(11), 1055–1075. <https://doi.org/10.32604/jrm.2019.08188>
- Morazán, L. (2021). *Evaluación comparativa de modificaciones implementadas a un nuevo prototipo de estufa mejorada, Justa 3D, mediante la prueba de Ebullición de Agua* [Tesis de Graduación, Zamorano, Honduras]. [bdigital.zamorano.edu. https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/abee39b7-513f-4fb5-8ec1-90200101bc54/content](https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/abee39b7-513f-4fb5-8ec1-90200101bc54/content)
- Munar-Flores, D. A., Ramírez-Contreras, N. E. y García-Núñez, J. A. (2022). Biocarbón como producto de la biomasa residual de palma de aceite en un concepto de economía circular. *Boletines técnicos*(41), 1–80.
- Nogués, F., García, D. y Reveau, A. (2010). *Energía de la Biomasa (volumen I)* (1ª ed., Vol. 173).
- Núñez, C. y Williams, D. (2012). Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta. *Tecnología Y Cultura Afirmando El Conocimiento (Tecnura)*, 16(34), 142–156. <https://www.redalyc.org/pdf/2570/257024712012.pdf>
- Obeng, S., Kamble, S. H., Reeves, M. E., Restrepo, L. F., Patel, A., Behnke, M., Chear, N. J.-Y., Ramanathan, S., Sharma, A., León, F., Hiranita, T., Avery, B. A., McMahon, L. R. y McCurdy, C. R. (2020). Investigation of the Adrenergic and Opioid Binding Affinities, Metabolic Stability, Plasma Protein Binding Properties, and Functional Effects of Selected Indole-Based Kratom Alkaloids. *Journal of Medicinal Chemistry*, 63(1), 433–439. <https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.9b01465>
- The Observatory of Economic Complexity. (2021). *Carbón de madera*. <https://oec.world/es/profile/hs/wood-charcoal>
- Organización de las Naciones Unidas. (s.f). *Energía asequible y no contaminante: Por que es importante*. ONU. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/7_Spanish_Why_it_Matters.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1991). *Conservación de energía en las industrias mecánicas forestales*. FAO. <https://www.fao.org/3/t0269s/T0269S14.htm>
- Patiño, P. (2014). Biomasa residual vegetal: tecnologías de transformación y estado actual. *Innovaciencia*, 2(1), 45–52. https://www.researchgate.net/publication/299547212_Biomasa_residual_vegetal_tecnologias_de_transformacion_y_estado_actual
- Pérez, A., Serret, N. y Penedo, M. (2022). Caracterización de la biomasa vegetal aserrín de pino. *Tecnología Química*, 42(3).
- Purdue University. (s.f). *Boiling*. Purdue University. <https://www.chem.purdue.edu/gchelp/liquids/boil.html>
- Sebola, R., Mokgatle, L. y Aboyade, A. (Eds.) (2014). *Solid Waste Quantification for the University of Johannesburg's Waste to Energy Project*. : Vol. 1. https://www.researchgate.net/publication/283212173_Solid_Waste_Quantification_for_the_University_of_Johannesburgs_Waste_to_Energy_Project

- Sis-Pitán, E. (2017). *Evaluación del rendimiento de carbón de pino y de encino, producción en hornos de ladrillo; granados, baja verapaz* [Tesis de grado]. Universidad Rafael Landívar, Guatemala.
- Sistema de la Integración Centroamericana. (2017). *Las energías renovables, la eficiencia energética: una apuesta estratégica para la carbono neutralidad en el beneficiado de café*. <https://www.sica.int/busqueda/Noticias.aspx?IDItem=109626&IDCat=3&IdEnt=1225&Idm=1&IdmStyle=1>
- Statista. (2023). *Date palm: global production 2021* | Statista. <https://www.statista.com/statistics/960247/dates-production-worldwide/>
- Torres, R., Montero, G., Beleño, M. T., Toscano, L. y Pérez Laura (2015). Lignina obtenida de residuos agrícolas como biocombustible de tercera generación. *Ciencia Y Tecnología*, 15, 151–164.
- World Bioenergy Association. (2021). *Global Bioenergy Statistics*. WBA. <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesiseortiz/2018/06/22/Sis-Edin.pdf>

Anexos

Anexo A

Galería Laguna Seca, Zamorano, 2022





Anexo C

Recolección de Residuos Secos en Zamorano, 2022



Anexo D*Balanza plataforma digital PREMIER 300 Kg*

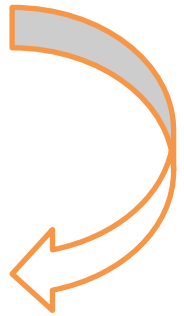
Anexo E

Pesaje de Hojas de Palma, 2023



Anexo F

Pretratamiento (secado) del Raquis



Anexo G

Equipo de Molienda



Anexo H

Raquis de Palma Molido



Anexo I

Mufła Termolyne, F-48055



Anexo J

Resultado de Muestra a 105 °C



Anexo K

Resultados de Muestra a 600 °C



Anexo L

Resultados de Muestras a 900 °C



Anexo M

Calorímetro Parr 6100



Anexo N

Estufa EnvirontFit G-3300



Anexo O

Reactor Pirolítico en Actividad



Anexo P

Estufa Jikokoa Classic, 2012



Anexo Q*Prueba en Campo del Carbón*