

**Universidad
Intercultural
Indígena
de Michoacán**



Ciencia y Tecnología

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

2025

MANUAL PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS, SUS IMPACTOS AMBIENTALES Y APLICACIONES EN TECNOLOGÍAS DE USO FINAL

Coordinadores:

Luis Bernardo López-Sosa

Ricardo González Cárabes

**MANUAL PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL
DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS, SUS
IMPACTOS AMBIENTALES Y APLICACIONES EN
TECNOLOGÍAS DE USO FINAL**

**Universidad Intercultural Indígena de Michoacán
Pátzcuaro, Michoacán.**

Derechos Reservados

Julio del 2025

Coordinadores:

Luis Bernardo López Sosa

Ricardo González Cárabes

Esta obra representa un esfuerzo coordinado, interinstitucional, para construir alternativas de aprovechamiento de residuos orgánicos que pueden originar biocombustibles del tipo sólido, para satisfacer eventualmente, necesidades energéticas individuales y colectivas de las comunidades rurales e indígenas de Michoacán.

MANUAL PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS, SUS IMPACTOS AMBIENTALES Y APLICACIONES EN TECNOLOGÍAS DE USO FINAL

Autores

Luis Bernardo López-Sosa*, Mario Morales-
Máximo*, José Guadalupe Rutiaga-Quiñones**,
Arturo Aguilera Mandujano* y Ricardo González
Cárabes*

*Universidad Intercultural Indígena de Michoacán

**Universidad Michoacana de San Nicolás de
Hidalgo

Material apoyado por la Secretaría de Ciencia,
Humanidades, Tecnología e Innovación del
Gobierno de México



Ciencia y Tecnología

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

Institución a la que se agradece el apoyo a
través del programa Estancias Posdoctorales
por México.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.	1
2. HACÍA METODOLOGÍA INTEGRAL PARA BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS	4
2.1. Análisis de la producción de residuos de biomasa	7
2.2. Caracterización de los residuos de biomasa. 10	
2.2.1. Caracterización morfológica y fisisicoquímica	12
2.2.2. Caracterización proximal y energética. .16	
2.3. Potencial energético disponible.	29
2.4. Directrices para la gestión de biocombustibles sólidos.	35
2.5. Identificación de tecnologías de uso final. 39	
3. COMENTARIOS FINALES	45
4. REFERENCIAS	47

1. INTRODUCCIÓN.

La biomasa podría ocupar un lugar importante para la generación de diferentes biocombustibles de tipo sólido, líquido y gaseosos, esto con la finalidad de mitigar los impactos ambientales generados de las actividades humanas y productivas que implican el desarrollo de buenas prácticas ambientales, en donde, la implementación o aplicación de tecnologías limpias son fundamentales para garantizar la sustentabilidad del medio ambiente [1]. Es por ello por lo que el aprovechamiento de la biomasa para la generación de bioenergía ha tomado importancia en un contexto internacional, con la finalidad de producir y utilizar una fuente de energía alterna para diferentes usos, así como ayudar a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, cuyo tratamiento suele ser un problema actualmente. Además la gestión de residuos de forma adecuada, representa una manera de mitigación ambiental y en muchos casos de valoración y origen de nuevas cadenas productivas de subproductos, cadenas energéticas y de procesos eficientes como la economía circular [2–5].

A nivel internacional, varios países han promovido políticas y regulaciones para fomentar el uso de la

bioenergía, incentivando la investigación, el desarrollo y la implementación de tecnologías relacionadas [6][7], ya que la producción de bioenergía abarca diversas aplicaciones, como la generación de electricidad, la calefacción y refrigeración, la producción de biocombustibles líquidos (como el biodiesel y el bioetanol), y el biogás para uso en transporte y como fuente de calor, los biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos son opciones renovables que pueden ayudar a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, cada tipo de biocombustible tiene sus ventajas y desventajas, y su aplicabilidad dependerá del contexto y las necesidades específicas de cada región o sector [8].

La diversificación, aprovechamiento y uso de fuentes como la bioenergía en países en vía de desarrollo, es de suma importancia y mediante procesos de gestión eficientes y sostenibles pueden satisfacer las necesidades locales de diversos sectores de la población, siendo una fuente renovables, económicamente rentable y que puede ser socialmente aceptable [5,9–11]. En este sentido la generación de cadenas bioenergéticamente productivas es una detonante a nivel mundial [11], que puede incentivar el desarrollo de plantas de procesamiento, biorrefinerías o centros de disposición final de nuevos combustibles, que además contribuyan a incentivar economías locales

y generen soberanía energética de forma regional [12–15]. Estos esquemas de descentralización de la energía no sólo son más eficientes, sino que también son más económicos de menor impacto ambiental y poseen resiliencia energética [16][17], los recursos bioenergéticos disponibles localmente no dependen de la volatilidad de precios y en casos extremos de emergencias sanitarias también son fuentes confiables [18].

En resumen, la bioenergía juega un papel significativo en el panorama energético mundial, proporcionando una alternativa sostenible y renovable a los combustibles fósiles, su continua expansión y desarrollo son fundamentales para lograr un futuro energético más limpio y sostenible a nivel internacional [19]. Los biocombustibles ofrecen una serie de ventajas, como su carácter renovable, su potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y su capacidad para contribuir a la seguridad energética; sin embargo, también presentan desafíos en términos de producción sostenible, uso responsable de tierras y competencia con la producción de alimentos [16,20,21], por lo que en este capítulo se aborda una propuesta metodológica integral para la gestión de los biocombustibles sólidos para países en vías de desarrollo, considerando por una parte la estimación de la producción de residuos, y por otra la factibilidad técnica, económica y ambiental para su gestión.

2. HACÍA METODOLOGÍA INTEGRAL PARA BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

Este manual sugiere una metodología integrada para definir la factibilidad de biocombustibles sólidos, desde la estimación de los residuos disponibles localmente hasta la identificación de tecnologías y/o procesos de uso final de la energía alimentados con estos combustibles alternativos. El siguiente flujograma muestra de forma ilustrativa las etapas de la metodología que se describirán a continuación (Figura 1).

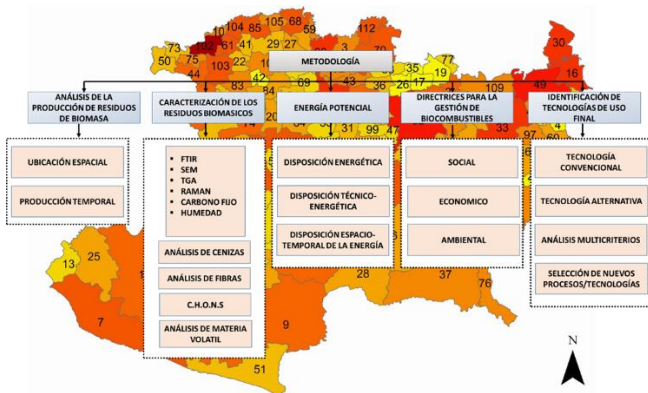


Figura 1. Diagrama metodológico propuesto.

La propuesta considera 5 etapas: (a) la identificación de los residuos disponibles localmente espacial y temporalmente (b) la

caracterización con diferentes técnicas de análisis especializadas, fisicoquímica, energéticas y proximales (c) la evaluación del potencial energético disponible in situ, espacial y temporalmente (d) la definición de directrices para la gestión de biocombustibles sólidos del tipo pellets, briquetas o bio-carbón, considerando factores territoriales y de factibilidad energética, y (e) la identificación de tecnologías de uso final para utilizar los posibles biocombustibles o la identificación procesos y cadenas de valor energéticas para satisfacer necesidades energéticas locales, residenciales, colectivas o para actividades productivas.

Estas etapas representan un hito genérico sobre cómo gestionar biocombustibles desde una perspectiva comunitaria, pero identificando su pertinencia social y factibilidad técnica. Y aunque se pretende que los residuos de biomasa disponibles localmente se aprovechen para satisfacer necesidades locales básicas, esta propuesta no se limita a definir una metodología o alcances cerrados, por el contrario, pretender ser un punto de inicio para que los investigadores, líderes comunitarios, comunidades rurales e indígenas, representantes gubernamentales, tecnólogos, miembros de la ONG's y público en general, identifiquen de forma sistémica los beneficios que

pueden alcanzarse con los residuos de biomasa, cuando la disposición de estos sea lo suficientemente representativa para tal objeto.

El alcance de esta metodología se vincula a poblaciones locales rurales o urbanas, donde existen residuos orgánicos residenciales, agrícolas, agroindustriales, forestales, alimenticios y de actividades productivas. Poblaciones con dos características: (a) generación de residuos de manera constante y representativos, y (b) capacidad de gestión de los residuos, acopio, procesamiento y disposición final, siempre que las características del territorio incluyendo la normativa local lo permita.

Por lo que esta propuesta es una recomendación general y se podrá ampliar, adecuada y apropiarse en las comunidades de diferentes sectores sociales, así como en las actualizarse continuamente. Se resalta también, que la integración de las etapas de esta metodología recopila años de experiencia sobre biocombustibles sólidos a partir de residuos de biomasa local. Y se invita a los tomadores de decisiones a indagar en esta propuesta para fortalecer el aprovechamiento de la bioenergía en el mundo, pensando global, actuando local.

2.1. Análisis de la producción de residuos de biomasa.

Cuando se trata de buscar alternativas de gestión de residuos orgánicos (Biomasa), la primera alternativa es la remoción de los sitios donde se generan con el objetivo de evitar la acumulación, la putrefacción y los efectos secundarios de residuos en descomposición. Posteriormente se analizan las alternativas de valoración y luego el desarrollo de cadenas productivas eficientes y rentables. En este sentido, es importante considerar la gestión de residuos de biomasa como áreas de oportunidad para promover la generación de alternativas energéticas, rentables, sostenibles y en muchos casos amigables con el medio ambiente. El uso de estos residuos puede generar biocombustibles del tipo sólido, líquido o gaseoso, la factibilidad dependerá de sus características fisicoquímicas, del interés del procesamiento y las tareas o necesidades que se busquen satisfacer.

Si bien es cierto que los biocombustibles del tipo líquido y gaseoso en muchos casos poseen elevados potenciales energéticos, también es cierto que la forma más sencilla de valorar energética residuos de biomasa es a través de los biocombustibles sólidos. Éstos sólo requieren la remoción de

humedad, trituración y procesamiento para uso final, que en muchos casos puede realizarse mediante el uso de fuentes renovables de energía. Además, los procesos de combustión en países en vías de desarrollo son elevados, los más comunes y en donde se consume la mayor cantidad de energía [22–25]. Y es la razón por que en este capítulo se analiza sólo la gestión de los residuos de biomasa para aplicaciones en biocombustibles sólidos.

La identificación de los residuos requiere de un análisis de la cantidad y de las características, y es importante conocer antes de realizar estudios específicos, la disposición de éstos de manera territorial y temporal. La magnitud de generación es determinante para indagar en la caracterización de los residuos de biomasa y sus posibles proyecciones, usos, y articulación con tecnologías y procesos. Algunas de las sugerencias para la evaluación de los residuos de biomasa disponibles localmente son los siguientes:

- Determinación muestral o total de los generadores de residuos: plantas, áreas de cultivo, instituciones, zonas forestales, viviendas, entre otras. Generando una matriz cualitativa de las regulaciones, acceso y posibilidad de extracción de residuos de los sitios donde se generan;

priorizando aquellos que tienen facilidad de análisis e investigación. También es necesario geolocalizar los puntos de generación, lo que permitirá en otras etapas articular la posible gestión de los residuos.

- Desarrollo y aplicación de instrumentos de obtención de datos cualitativos y cuantitativos, para conocer mediante diagnósticos exploratorios la cantidad de residuos generados. Y que cuando las circunstancias lo permiten, se pueden aplicar encuestas para conocer las particularidades de la generación de los residuos, describiendo las anomalías de producción o de los residuos (cuando existen). Así las mediciones de la producción se realizan por día, semana y mes, en periodos de producción “Modelo” (Cuando no existen anomalías en la producción), utilizando balanzas digitales o con datalogger para registrar los datos de generación.
- Procesamiento de datos. Que a partir del diagnóstico anterior se pueden hacer análisis estadísticos, estudios de muestreo y validación y generar bases de datos para conocer la frecuencia de generación y delimitar los meses de mayor y menor

producción de residuos, así como una tabla de barreras que pueden limitar o incentivar la generación.

De esta forma se puede conocer la disposición temporal y territorial de los residuos, cuyos datos pueden interpretarse a través de herramientas estadísticas, de análisis espacial o incorporarse a bases de datos. En cualquier caso, esta información es de utilidad para otras etapas de la metodología propuesta.

2.2. Caracterización de los residuos de biomasa.

Después de identificar los residuos de biomasa disponibles, la metodología propuesta sugiere el procesamiento y preparación de muestras. Esto es a través de un proceso de lavado para eliminar la presencia de impurezas que pueden sesgar en análisis de las muestras; posteriormente se debe llevar a cabo un proceso de secado que se adapte a las necesidades de quien realice la investigación o estudio, haciendo uso de combustibles convencionales o bien utilizando fuentes de energía renovables. Después del secado, las muestras deberán ser trituradas mediante molienda

mecánica, con equipos que estén al alcance o bien, utilizando trituradoras industriales (Figura 2); esto también dependerá de las características de los residuos de biomasa, las cuales en ocasiones después del secado siguen siendo fibrosos y posee consistencia rígida difícil de triturar como los residuos de mango [26,27], en tanto que otros pueden ser fáciles de pulverizar incluso con un mortero de ágata, como es el caso de las plantas medicinales o de algunas algas como el sargazo [28,29]. Una vez pulverizadas las muestras de interés, se podrán realizar diferentes caracterizaciones que a continuación se describen. Este apartado no describe el funcionamiento de las técnicas de caracterización, pero se invita al lector a profundizar en ellas en libros especializados para este objetivo [30–33], y sólo se centra en una puntual recomendación de aquellas que son complementarias y permiten el análisis de forma integral, también se mencionan algunas precisiones sobre diversos análisis que pueden aplicarse a biomasa residual.

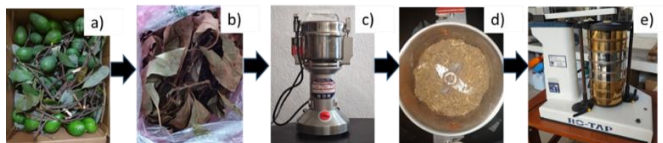


Figura. 2 Etapa de recolección y procesamiento de los residuos. a) recolección de residuos agrícolas,

b) deshidratación de residuos, c) molino convencional, d) residuos pulverizados, e) tamizado.

2.2.1. Caracterización morfológica y fisicoquímica

La forma de las partículas y aglomerados que forman las componentes unitarias de la biomasa residual, pueden analizarse detalladamente. Lo que permite conocer su porosidad, geometría y también la presencia de material que ha contaminado la muestra a nivel microscópico o incluso nanométrico. Para estos análisis el uso de microscopios ópticos es limitado, por lo que una alternativa es el microscopio electrónico de barrido (SEM), lo que la luz permite en el microscopio óptico en el microscopio de barrido son los electrones [30]. El SEM logra magnificaciones de varias decenas de miles de aumentos, lo que hace posible analizar las partículas de biomasa triturada en escalas incluso nanométricas. Y opera mediante dos tipos de electrones que interactúan con la muestra:

- Electrones secundarios, que logran imágenes de campo claro de forma

tridimensional, lo que permite conocer la morfología de la imagen.

- Electrones retrodispersados, lo que permiten interactuar con la superficie de la muestra y presenta resultados de mejor resolución en la morfología por contraste químico.

El SEM también permite un análisis químico semicuantitativo, que se logra a partir de dispersión de energías de rayos X (EDS), y proporciona como resultado una tabla del porcentaje en peso y la identificación tipo “mapeo químico” de los elementos presentes en la muestra analizada; y aunque es una herramienta general, es útil de forma preliminar como conocer la composición química en regiones o de puntos específicos. En el caso de la biomasa estas herramientas son preliminares y se pueden complementar con otras técnicas de caracterización.

Le proceso de análisis en un SEM, deberá considerar una muestra con el menor contenido de humedad posible, triturada y sólo se requieren algunos miligramos de muestra que se colocarán en un porta-muestra y serán introducidos a una cámara de vacío donde se analizarán mediante detectores que registran las interacciones del haz de electrones con la muestra de biomasa.

Por otra parte, para materiales orgánicos la espectroscopía Raman permite la identificación de bandas características para determinar la presencia de ciertos compuestos. El equipo trabaja con diferentes láseres dependiendo el tipo de muestra, en específico para las muestras orgánicas el tiempo de residencia del análisis no debe ser intenso si prolongado por lo que se recomienda configurar el equipo con un láser de 532 nm, potencia de 5mW y apertura de 50 μm . Los resultados de las bandas resultantes del análisis se procesan mediante software especializados o se contrastan con la identificación de bandas características reportados en la literatura de la especialidad.

Así, otra técnica también complementaria como la espectroscopía Raman, es la espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier, que permite identificar grupos funcionales que se asocian determinados compuestos presentes en la materia orgánica. En esta técnica el láser es menos invasivo que el de la espectroscopía Raman, puesto que la muestra se confina en pastillas para su análisis. El resultado del análisis es un espectro que permite identificar bandas de transmitancia que son identificadas por el software del equipo y que también pueden analizarse con lo reportado en literatura especializada.

Ambas técnicas espectroscópicas son útiles en materiales orgánicos, como los residuos de biomasa, y pueden complementar las caracterizaciones de caracterización de los compuestos poliméricos como celulosa, hemicelulosa y lignina, ayudar a identificar algunos de los extraíbles, así como carbohidratos como sacarosa que está presente en algunos residuos frutícolas.

El análisis termogravimétrico es una técnica que se utiliza para identificar mediante rampas de calentamiento la degradación de materiales, por ende, algunos compuestos como aquellos poliméricos que contribuyen al poder calorífico de los residuos que pueden ser utilizados en biocombustibles sólidos; también permite generar modelos matemáticos que permiten estimar energía de activación, generación de emisiones y estimación de posibles gases para combustión como metano e hidrogeno [8,34,35]. Esta técnica es una herramienta bastante amplia y considera para su análisis rangos de temperatura, velocidad de calentamiento, temperaturas de equilibrio y procesamiento de datos. El estudio termogravimétrico es sofisticado, pero permite ampliar investigaciones de interés para el análisis de otros tipos de biocombustibles como líquidos y gaseosos.

2.2.2. Caracterización proximal y energética.

Los análisis proximales son una serie de pruebas y ensayos de laboratorio que se realizan en los biocombustibles sólidos para determinar su composición básica y características fundamentales. Estos análisis proporcionan información crucial sobre la calidad y el potencial de los biocombustibles sólidos para su uso como fuente de energía renovable [36,37]. Para la producción de los biocombustibles sólidos se deben tomar ciertos parámetros, como contenido de humedad, poder calorífico y el análisis proximal (contenido de cenizas, material volátil y contenido de carbono fijo), esto con el fin de determinar qué tan eficiente es el biocombustible que se requiere producir [38].

El contenido de humedad determina la cantidad de agua presente en el biocombustible, ya que la humedad afecta directamente su poder calorífico y capacidad para producir energía, puede determinarse en base seca o en base húmeda y representa una característica importante para cualquier análisis a realizarse sobre un material sólido. La Norma (UNE EN 14774-1, 2010) [39], establece el método de ensayo mediante el secado en estufa, en él se somete a la muestra a una temperatura de 105 °C hasta que la masa se mantenga constante. Esta característica es muy

importante debido a que el poder calorífico de cualquier biocombustible forestal disminuye al aumentar la humedad de este. Para determinar el contenido de humedad se expresa con ecuación (1) [40].

$$CH = \left(\frac{P_h - P_s}{P_s} \right) \times 100 \quad (1)$$

dónde:

CH = Contenido de humedad (%)

Ph = Peso húmedo de la briqueta (kg)

Ps = Peso seco de la briqueta (kg)

El contenido de cenizas mide la cantidad de residuos inorgánicos que quedan después de que el biocombustible se quema, las cenizas afectan la eficiencia de la combustión y pueden causar problemas en los equipos de calentamiento y generación de energía [41]. Para determinar el grado de cenizas que se produce en el proceso de combustión de los biocombustibles sólidos, el cual indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material, el proceso queda determinado mediante el procedimiento expuesto en la norma UNE - EN 14775, 2010 [42]. Esta norma explicita que el ensayo trata de calentar una muestra del biocombustible en aire bajo condiciones estrictamente controladas de tiempo y peso a una temperatura controlada de 550°C

aproximadamente. Para determinar el contenido de cenizas se expresa con la ecuación (2) [43].

$$A = \left(\frac{W_r}{W_m} \right) \times 100 \quad (2)$$

dónde:

A = Contenido de Cenizas (%)

W_r = Peso del residuo de la muestra (kg)

W_m = Peso seco de la briqueta (kg)

El contenido de materia volátil representa la fracción del biocombustible que se volatiliza durante el calentamiento. El contenido de materia volátil influye en el proceso de combustión y en la generación de calor [44]. Para la determinación de la cantidad de materias volátiles se sigue el procedimiento de acuerdo a la norma ASTM E872-82 [45]. El cálculo del contenido de materiales volátiles se realiza con la ecuación (3):

$$MV = \frac{m_2 - m_3}{m} \times 100 \quad (3)$$

Dónde:

MV = Contenido de materiales volátiles en %,

m₂ = masa inicial del crisol + muestra, en gramos

m₃ = masa final del crisol + muestra, en gramos

m = masa de la muestra en gramos

El nivel de precisión en la determinación de los porcentajes de materiales volátiles no debe diferir uno de otro en más de 2%. Para esta prueba se utilizó tres muestras de cada residuo.

El contenido de carbono fijo indica la cantidad de carbono presente en el biocombustible que permanece en forma sólida después de la combustión. El carbono fijo es una medida importante para evaluar la calidad y la eficiencia del combustible [46]. Para este análisis el cálculo se estima por diferencia, restando el contenido de cenizas y volátiles del 100% [47], utilizando la ecuación (4)

$$FC = 100 - AC - VM \quad (4)$$

donde

FC = el contenido de carbón fijo en base seca (%)

AC = el contenido de cenizas de la base seca (%)

VM = el contenido de material volátil en la base seca (%)

El poder calorífico mide la cantidad de energía que puede producir el biocombustible cuando se quema completamente, es un parámetro crucial para determinar la eficiencia y el rendimiento energético del combustible, altos poderes caloríficos indican

buenos combustibles y bajos poderes caloríficos señalan combustibles deficientes [37].

Para la determinación del poder calorífico de forma experimental; se realiza siguiendo la norma UNE-EN 14918:2011 [48]. En este análisis experimental se utiliza un equipo denominado calorímetro, que es un recipiente adiabático que contiene en su interior la bomba de combustión y agua, además, también dispone de un agitador, un termómetro y el cableado necesario para la ignición [49].

Otra forma de realizar el análisis del poder calorífico es siguiendo un modelo matemático reportado en investigaciones anteriores para materiales lignocelulósicos [19,50]. Para el caso de biocombustibles sólidos de residuos maderables y con base en los análisis químicos desarrollados, se utilizan modelos de predicción basados en análisis elemental, sustituyendo los valores en los siguientes indicadores y utilizando la ecuación (5):

$$HHV = 0.335C + 1.423H - 0.154O - 0.145N \quad (5)$$

donde

HHV = poder calorífico (MJ/kg)

C = carbon

H= hidrogeno

O= oxigeno

N= nitrogeno

Una vez sustituidos los valores de la ecuación (5), el siguiente paso es sustituir los valores necesarios (el análisis proximal) [51] en la ecuación (6):

$$HHV = 0.3543FC + 0.1708VM \quad (6)$$

donde

HHV = Poder Calorífico (MJ/kg)

FC = Carbono fijo

VM = Material volátil

Y conjuntando y simplificando las ecuaciones (5) y (6), se puede obtener la ecuación (7) para determinar el poder calorífico [52].

$$HHV = 19.914 - 0.2324A \quad (7)$$

donde

HHV = Poder calorífico superior (MJ/kg)

A = Contenido de cenizas

Los análisis proximales son fundamentales para comprender las características de los biocombustibles sólidos y para garantizar su uso eficiente y seguro en aplicaciones de generación de energía, al conocer estos parámetros, los usuarios pueden seleccionar el biocombustible más adecuado para sus necesidades energéticas y tomar

decisiones informadas en cuanto a la gestión y el tratamiento de los residuos orgánicos para la producción de energía.

Otro análisis relevante es el elemental, que permite determinar el contenido de elementos presente en ciertos combustible, pero únicamente aquellos que supondrán un aporte calorífico en las reacciones de combustión. Así, el análisis elemental incluye el porcentaje en peso de C, H, O, N, S, cenizas, humedad (pérdida de peso a 105 °C, para combustibles sólidos) y agua combinada (equivalencia de oxígeno). En algunos casos, se deben analizar otros elementos que puedan influir en el proceso de combustión o puedan resultar problemáticos en cuanto a las emisiones o los efectos medioambientales que causan (como los halógenos o los metales). La cantidad de oxígeno presente en los combustibles reduce el poder calorífico, sin embargo, contribuye a reducir las necesidades de aire de combustión. El contenido de nitrógeno y azufre tiene un impacto directo en los efectos derivados de la lluvia ácida [16,53].

El contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, y azufre se miden en un analizador elemental (por ejemplo un Modelo 4010; Costech International S.p.A., Milán, Italia) siguiendo la norma UNE-CEN/TS 15104 EX [54]. Para determinar dichos

elementos para los casos de biocombustibles sólidos, se utiliza biomasa selecta, que se tamiza en malla 40, absolutamente seca, y solamente el contenido de oxígeno se calcula por diferencia de los datos obtenidos del resto de los elementos [2].

En cuanto al azufre, es un elemento químico que puede desempeñar un papel crucial en el análisis de fibras para biocombustibles sólidos, ya que su contenido puede tener un impacto significativo en la calidad y eficiencia de estos biocombustibles, en muchos países existen regulaciones estrictas sobre los niveles de azufre permitidos en los combustibles, incluidos los biocombustibles [19,55].

El azufre puede generar emisiones de dióxido de azufre durante la combustión (SO_2), lo que contribuye a la formación de lluvia ácida y afecta negativamente la calidad del aire. Por lo tanto, es fundamental evaluar el contenido de azufre en las fibras para asegurarse de que los biocombustibles sólidos cumplan con los estándares ambientales establecidos. Además, alto contenido de azufre en los biocombustibles sólidos puede afectar la eficiencia de la combustión y provocar la liberación de contaminantes y productos de combustión indeseables, El azufre puede generar cenizas con altos niveles de este elemento, lo que puede

obstruir los sistemas de combustión y reducir la eficiencia energética de las plantas de energía [56,57]. Por otro lado, el contenido de azufre puede afectar la calidad del producto final en los biocombustibles sólidos perjudicando directamente la calidad del producto final y su capacidad para reemplazar o mezclarse con combustibles fósiles convencionales, un bajo contenido de azufre en los biocombustibles sólidos puede mejorar la aceptación y viabilidad de su uso en diversas aplicaciones energéticas [58,59].

Por todas estas razones, el análisis del contenido de azufre en los residuos de biomasa para la producción de biocombustibles sólidos es esencial para garantizar la sostenibilidad, la eficiencia energética y el cumplimiento de los estándares ambientales en el sector de la bioenergía. Este análisis forma parte de los controles de calidad necesarios para asegurar que los biocombustibles sólidos sean una opción viable y ecológicamente responsable.

El análisis de fibras es otra técnica bastante útil. Permite la identificación de materiales lignocelulósicos, que son ampliamente utilizados en la industria papelera, textil, y en la producción de biocombustibles y productos biodegradables [16,19]. Diversos residuos de biomasa se distinguen

por la presencia de compuestos poliméricos, tres grupos de sustancias estructurales, y un cuarto grupo no estructural que son las llamadas sustancias extraíbles, además de sustancias inorgánicas. Los grupos estructurales son: celulosa, hemicelulosas y lignina, de los cuales la celulosa tiene un papel central, puesto que forma el esqueleto o basamento de la pared celular. Así pues, algunos residuos de biomasa poseen una estructura fibrosa formada básicamente por celulosa, $C_6H_{12}O_5$, (50%), que constituye la estructura resistente de los vegetales, y lignina, $C_{19}H_{24}O_{14}$, que proporciona la rigidez y dureza a la madera. Además, contiene, en menor proporción, en muchos casos resinas, almidón, azúcares, taninos, colorantes, alcoholes, y alcanfor, que son productos de utilidad industrial [60,61].

El análisis de la composición química de los principales componentes poliméricos de biomasa (celulosa, hemicelulosa y lignina), se realiza mediante un estudio de fibras basado en el método gravimétrico denominado Van Soest utilizando α -amilasa [62]. Para ello se toma 0.5 g de muestra de la biomasa maderable seca a analizar de tamaño de partícula homogénea (a través de una malla 60/40, 0.274/0.516 mm). Los análisis se realizan en tres repeticiones para cada muestra para mayor veracidad en los resultados, a través de un equipo

ANKOM-200 [63]. De este análisis se obtiene el porcentaje presente en la lignina en el residuo maderable. La lignina es un polimérico complejo y amorfo que se encuentra en las paredes celulares de las plantas, y es ayuda a la resistencia y rigidez de las fibras vegetales, y está presente en la biomasa lignocelulósica [56,64,65].

En los análisis de fibras para biocombustibles sólidos, la determinación de la cantidad de lignina es determinante para evaluar la calidad y la eficiencia del proceso de conversión. Un alto contenido de lignina puede requerir procesos más complejos y costosos, como la hidrólisis enzimática o pirólisis, para descomponer la biomasa en sus componentes básicos y, finalmente, obtener biocombustibles. Además, el contenido de lignina también influye en las propiedades físicas y térmicas de los biocombustibles sólidos. Por ejemplo, la lignina es menos densa y tiene un menor poder calorífico en comparación con la celulosa y la hemicelulosa. Esto puede afectar la eficiencia energética y el rendimiento del combustible en diferentes aplicaciones [11,66]. Por lo tanto, el análisis de fibras para biocombustibles sólidos debe incluir la determinación del contenido de lignina para evaluar la calidad de la biomasa, la eficiencia del proceso de conversión y predecir las propiedades del biocombustible resultante. Un

mejor entendimiento de la lignina y su impacto en el proceso de producción de biocombustibles sólidos es bastante útil.

Otra caracterización importante es la determinación de emisiones. Los subproductos gaseosos de la combustión se convierten en CO₂, y su contribución neta al calentamiento global se mide como CO_{2e} [67]. Aunque la biomasa genera emisiones de forma diversa, en cada país existen inventarios de emisiones, y también instituciones a nivel mundial que generan bases de datos sobre las emisiones por unidad de combustible (Litro/kg/MJ) [68–70]. Datos con los que se pueden estimar por tarea, proceso, energía final o energía útil, la cantidad de emisiones que se producen con el consumo de algún combustible, o biocombustible. Si bien las emisiones del consumo de biomasa son cuantiosas, cuando los procesos de gestión y manejo de recursos naturales son sustentables, puede existir neutralidad en los procesos de combustión, puesto que durante su vida la biomasa genera captura de CO₂. Sin embargo, cuando los biocombustibles provienen de residuos de biomasa, no es común contar con bases de datos de estos recursos residuales, por lo que es necesario realizar estimaciones específicas en medidores de gases de combustión para conocer la generación de CO₂ por unidad de masa combustionada. En este sentido,

una forma sencilla de analizar la mitigación o los impactos que se pueden generar en reducción de emisiones por el uso de biocombustibles sólidos es a través de la estimación del potencial energético como energía final. Equiparando la energía que se puede producir con residuos sólidos que será equivalente a la que no se consume de forma convencional en forma de gas L.P., leña, carbón o electricidad. Así, utilizando los factores de emisión de los combustibles convencionales será posible conocer la reducción de impactos ambientales en forma de emisiones. Además, esta estrategia es más integral, porque posibilita también estimar de forma general emisiones presentes en los otros combustibles, como NO_x, SO_x, CH₄, CO y material particulado PM_{2.5} y PM₁₀. Algo similar que puede aplicarse a estimaciones económicas por reducción en la dependencia de recursos financieros utilizados en combustibles tradicionales. Estas estimaciones son útiles para conocer de forma inicial impactos económico-ambientales y determinar la factibilidad de uso de biocombustibles sólidos mediante el potencial energético disponible; y que sin construir ninguna planta de producción sirve para tomar decisiones trascendentales.

2.3. Potencial energético disponible.

La identificación del potencial energético disponible para biomasa sólida que puede aplicarse en biocombustibles sólidos considera tres etapas:

- a) La identificación del recurso energético disponible.

El recurso energético teóricamente disponible se estima a partir de los datos del diagnóstico de residuos producidos en la zona de estudio. Y se combina con los datos de la caracterización, principalmente del poder calorífico identificado. Así, el potencial energético de la biomasa se obtiene de la relación entre la masa de residuo seco (Mrs) y la energía del residuo por unidad de masa (E), también conocida como poder calorífico (PC). La ecuación (8) expresa la relación entre las variables y propone un modelo matemático aproximado para determinar el potencial energético disponible [71].

$$PE = (Mrs) * (E) \quad (8)$$

dónde:

PE : Energía potencial [TJ/kg]

Mrs : Masa de residuo seco [t/año]

E : Energía del residuo por unidad de masa [TJ/t]

CV : Valor calorífico (MJ/kg)

Las unidades del potencial energético se adaptan a las magnitudes de la cantidad de biomasa residual disponible. Si bien esta aproximación general es habitual para conocer de forma preliminar el potencial energético, en estos casos la biomasa se considera con el menor contenido de humedad posible, que mayoritariamente ronda el 12%, y por los valores estimados del poder calorífico supone un valor superior.

Sin embargo, en condiciones reales, es difícil conocer todo el contenido de humedad en la biomasa residual [72], desde aquellos residuos que cuenta con valores superiores al 75% de humedad como frutícolas o de biomasa de cuerpos de agua, hasta la biomasa forestal. No es posible generalizar, pero en condiciones controladas, se pueden hacer análisis estadísticos que permitan conocer el valor del contenido de humedad de la biomasa que es potencialmente dispuesta a ser combustionada o que se combustiona. En estos casos, de manera más precisa se puede estimar el poder calorífico neto real ($H_{v(w)}$), que considera el poder calorífico de la materia seca $H_{v(wf)}$, y el contenido de humedad de la biomasa (w), y se estima con la siguiente ecuación (9) [72,73]:

$$H_{v(w)} = \frac{H_{v(wf)}[(100-w)-2.44w]}{100}$$

(9)

La constante 2.44 resulta del calor de evaporación de agua [73], así con la expresión anterior se infiere que cuando la humedad de los residuos de algún tipo de biomasa supera el 80%, el poder calorífico neto real será muy cercano a cero, es decir mayor humedad es sinónimo de menor energía potencialmente disponible de ser entregada en procesos de combustión. Esta consideración asume que los valores reales del poder calorífico disponible en los residuos de biomasa siempre estarán por debajo de los valores registrados en condiciones de laboratorio, donde usualmente las variables como la humedad están controladas.

b) La disposición técnica-energética

Si bien la conjunción de los datos del poder calorífico y la producción de residuos son útiles para conocer el potencial energético disponible, también se debe precisar que es importante establecer algunas recomendaciones para ponderar la factibilidad técnicas de los residuos analizados, esto es:

- i) La recolección y procesamiento. Que permite integrar una muestra representativa que será posible de analizar en casos futuros. Además, el procesamiento suele eliminar el mayor contenido de humedad por una parte

para lograr la caracterización de los residuos y por otra parte para analizar la textura y posibilidad de uso como biocombustible sólido.

ii) La asequibilidad de recolección. Existen casos donde los residuos son abundantes pero la recolección, procesamiento y traslado encarecen el proceso, lo que limita la rentabilidad económica y, por ende, la factibilidad social y asequibilidad de los combustibles.

c) Disposición espacio temporalmente disponible.

Además de la definición de la masa y el contenido energético de los residuos es importante definir la disposición espacial y temporal de estos recursos. Se debe conocer los puntos focales de generación de residuos, sus características, puntos de acceso, facilidad de extracción, normatividad para el copio, traslado y gestión, así como la ubicación geográfica, la cercanía con vías terrestres y marítimas, la afluencia y cercanía de vialidades y la definición de espacios libres de uso, disponibles y cercanos a los puntos de mayor intensidad de generación de residuos.

La estimación de los residuos generados y la energía disponible depende también de una escala temporal. Acotada al periodo de productividad, en algunos casos vinculado a los tiempos de cosecha, importancia de recursos orgánicos, o bien simplemente por la vocación productiva de las regiones, empresas o agricultores. En cualquier caso, se debe definir una escala de tiempo anual y realizar estimaciones mensuales para conocer el potencial energético disponible durante un año “modelo”, es decir un año que es estadísticamente común conforme a la escala de tiempo de los últimos años sin presentar anomalías. Cuando existen perturbación en los sistemas de producción de residuos en el último año se deben utilizar datos de años anteriores o esperar a realizar un análisis en un año subsiguiente que sea ordinario; para evitar la distorsión o sesgo de la información que se analiza.

Se recomienda hacer una delimitación geográfica (Latitud y longitud) de los puntos de generación, y trazar la intensidad de producción con el potencial energético. Mediante el uso de software de análisis espacial como QGIS o ARQGIS, es posible elaborar mapas de distribución energética por zonas o puntos focales que se contrastes con las vías terrestres o marinas y la facilidad de acceso a accesos fluidos para el traslado de los residuos. El

objetivo del análisis espacial del potencial energético disponible es:

- Identificar las áreas disponibles para centros de acopio. Estos serán aquellos que puedan almacenar semanalmente la materia recolectada de los principales puntos de mayor generación de residuos. Y su cercanía deberá ser radial de forma que se puedan concentrar en un espacio concéntrico, en cuyo caso se identifiquen vías terrestres o marinas que conecten a todos los puntos de generación de residuos con el centro de acopio. Estos espacios deberán situarse distantes de las zonas urbanas, debido a que centros de gestión de residuos puede desprender sustancias poco convenientes para el sector residencial.
- Centros de procesamiento. Estos espacios deberán ser concéntricos a los puntos de acopio lo más equidistantes posibles. Que cuenten con conectividad suficiente para concentrar la materia prima de los centros de acopio y los servicios básicos de acceso a combustibles necesarios para la operación y mantenimiento de máquinas y herramientas para el

proceso de secado, triturado compactado y embalado. El lugar de ubicación podrá ser en la periferia de las zonas urbanas, donde se puedan contar con la operación del equipo necesario y sea de fácil acceso para el personal que opere estos espacios.

- Los centros de disposición final. Son los espacios con mayor conectividad entre la zona urbana, los centros de procesamiento y las vías principales de movilidad en los sitios donde se realiza la definición del estudio. Estos centros contarán con la particularidad de ser establecimientos con bodega de almacenamiento de los combustibles sólidos que se generen.

2.4. Directrices para la gestión de biocombustibles sólidos.

Hasta ahora se han abordado aspectos metodológicos vinculados a la identificación de residuos de biomasa, su caracterización y la determinación del potencial energético disponible. Permitiendo inferir posibles escenarios para definir cadenas productivas de gestión de residuos para el

desarrollo de biocombustibles sólidos. La estrategia de gestión de biocombustibles sólidos no está únicamente vinculada a esta cadena productiva, también se deben considerar algunos otros aspectos que se vinculen con las dimensiones de la sostenibilidad, entre las que resaltan:

- Ambientales. La gestión de residuos de biomasa puede ser ambientalmente viable si el proceso mantiene prácticas de bajo impacto. La cadena productiva requerirá de consumo de energía para el traslado a centros de acopio, el secado, procesamiento y transformación en pellets, briquetas o bio-carbón, tipos de biocombustibles sólidos, también el traslado del producto final para disposición al usuario. Así que es necesario acotar el transporte a través de vehículos de bajas emisiones como los automóviles híbridos; el procesamiento que puede generarse mediante tecnologías pasivas con funcionalidad mecánica o artesanal, o bien con equipos sistematizados, pero de baja potencia para que su consumo energético pueda proveerse mediante fuentes renovables de energías disponibles localmente: energía solar, minihidráulica, eólica o también bioenergía. Además, se puede complementar el uso de estos combustibles alternativos a través de

ecotecnologías, como estufas ahorradoras de leña [74–77].

- Económicos. Los residuos de biomasa son rentables inicialmente mientras no posean un valor añadido, pero una vez que se identifica y disemina su uso, éstos dejan de ser gratuitos y los precios en ocasiones se monopolizan o son bastante volátiles. Por lo que es necesaria la elaboración de una alternativa justa y asequible de compraventa de estos recursos, donde los productores y recolectores definan un precio adecuado que incentive la valoración de los residuos, pero manteniendo un esquema de precios accesibles al término de la cadena energéticamente productiva, es decir del producto final (biocombustible) comparado con los combustibles de uso convencional. También, se requiere que todos los procesos de obtención de biocombustibles se lleven a cabo de manera local y con la mayor cantidad de recursos locales (materias primas/recursos energéticos/tecnologías de procesamiento), así como mano de obra local para mantener un esquema de economía local y solidaria, así como evitar encarecer los precios finales de estos productos energéticos al depender de agentes externos. La producción local es un factor importante que garantiza la

factibilidad económica de los biocombustibles, de otra forma la estrategia de gestión será poco viable o no atenderá las necesidades energéticas locales.

- Sociales. Que logren la gestión del proyecto en tiempo y forma, técnicamente viable y socialmente aceptable. Se sugieren dos esquemas de operación: (1) la generación de emprendimientos locales que incentiven económicamente esta propuesta en su etapa inicial, definan explícitamente la cadena productiva desde la identificación de la materia prima hasta la determinación de su factibilidad técnico-energética, y que se fomente el desarrollo de asociaciones o cooperativas energéticas que localmente puedan gestionar la cadena de valor de biocombustibles sólidos, buscar financiamiento y poner en operación las estrategias técnicas que logren la transformación de residuos en productos de uso final, y (2) la articulación con esquemas normativos y programas socio-empresariales que promuevan la aceleración de los emprendimientos mencionados, regulen el funcionamiento de posibles plantas de generación de biocombustibles, generen incentivos y permitan la sostenibilidad del proyecto.

Si bien, estas recomendaciones pueden ser generales y con limitaciones, representan experiencias en común de diversos proyectos de implementación a escala local de residuos sólidos para países en vías de desarrollo. Además, sugieren algunas directrices que se deben considerar cuando se parte de la identificación de potencial energético a partir de residuos de biomasa y se pretende migrar a cadenas energéticamente productivas sustentadas en biocombustibles sólidos locales, cuyos beneficios además de energéticos también pueden ser económicos y socioambientales.

2.5. Identificación de tecnologías de uso final.

Aquí se describen algunas tecnologías apropiadas para la utilización de biocombustibles sólidos en dispositivos de uso final. Estos se refieren a las herramientas, equipos y procesos que permiten aprovechar de manera eficiente estos combustibles de origen biomásico en diversas aplicaciones. Recapitulando, los biocombustibles sólidos son aquellos que se presentan en forma de rígida, como pellets, biocarbón, briquetas o astillas, y se obtienen a partir de materiales orgánicos renovables, como la biomasa forestal, residuos agrícolas o agroindustriales, desechos de la

industria maderera, entre otros. Estos combustibles son considerados una alternativa sostenible en comparación con los combustibles fósiles [9,78], y requieren de tecnologías que permitan su fabricación, por ejemplo, briquetadoras y peletizadoras. Que son equipos que transforman la biomasa en forma de residuos agrícolas, agroindustriales o forestales en materiales unitarios de mayor densidad y mejor calidad para su transporte y almacenamiento. Estos combustibles pueden ser o no industrializados, y su proceso de fabricación es bastante adaptativo [79–82]. La forma industrializada de producción cuenta con un proceso de compactación y las máquinas están diseñadas para operaciones a gran escala, se utilizan principalmente en la producción conforme a la necesidad del usuario, pueden tener una mayor capacidad de producción y están diseñadas para un uso continuo y pesado. La forma no industrializada, se realiza con dispositivos más pequeños y adecuados para aplicaciones más pequeñas o de uso doméstico, tienen capacidades de producción más bajas y pueden ser operadas manualmente o con una energía menos potente, tienen una capacidad de producción más limitada [49][83][84]. Los biocombustibles sólidos, se pueden utilizar en diversos dispositivos de uso final para generar calor y energía. A continuación, se mencionan algunos

ejemplos de dispositivos de uso final donde se pueden aplicar estos combustibles alternativos:

- Estufas de biomasa. Dispositivos que utilizan biocombustibles sólidos, como pellets de madera, cáscaras de nuez, briquetas de biomasa, entre otros, para generar calor para calefacción residencial o industrial [85].
- Calderas de biomasa. Son sistemas de calefacción central que utilizan biocombustibles sólidos para generar agua caliente o vapor que se puede utilizar para calefacción y producción de energía [86].
- Secadores agrícolas en el sector agrícola, para secar cultivos como granos y frutas pueden ser alimentados con biomasa sólida como fuente de calor [87].
- Estufas ahorradoras de leña, utilizadas en algunos hogares para la coacción de diferentes alimentos y como sistemas de calentamiento de agua [77].
- Generadores de energía eléctrica, que en algunas regiones rurales, los generadores eléctricos pueden utilizar biomasa sólida para producir electricidad, especialmente cuando las redes eléctricas convencionales no están disponibles [88].
- Estufas y calderas de biomasa, como sistemas de calefacción y generación de

calor que utilizan pellets, astillas o briquetas como combustible. Estos equipos son eficientes y pueden utilizarse en entornos residenciales, industriales y comerciales [89].

- Plantas de gasificación. Mediante un proceso que convierte la biomasa sólida en un gas de síntesis, que luego puede ser utilizado para generar electricidad o producir combustibles líquidos [90].

Para satisfacer necesidades energéticas específicas, se deben conjuntar la factibilidad de potencial energético disponible con la definición de tecnologías de uso final eficientes y sustentables que pueden ser alimentadas por biocombustibles sólidos derivados del proceso de determinación de potencial energético. La identificación de las tecnologías de uso final acopladas a los biocombustibles debe realizarse de forma sistemática para ello la presente propuesta metodológica sugiere que:

- i) Se defina las tecnologías que actualmente se utiliza y con la que se satisfacen las necesidades, sus características cualitativas y cuantitativas del consumo. Para conocer

- el proceso de uso, y eficiencia energética del proceso de referencia o base.
- ii) La identificación de tecnologías alternativas que pueden satisfacer la demanda actual, pero cuya alimentación puede ser algún biocombustible sólido de acuerdo con las caracterizaciones realizadas en etapas anteriores. Que además sean tecnologías eficientes y con materiales locales y de bajo impacto ambiental.
 - iii) Realizar un análisis multicriterio [21,12], en las tecnologías identificadas, para generar un marco comparativo con parámetros e indicadores cuantitativos que permitan conocer la tecnología factible para su acoplamiento a los biocombustibles sólidos que sean más convenientes.
 - iv) La selección de la tecnología de uso final que puede satisfacer la necesidad o demanda energética, la cual será aquella con mejor evaluación resultado del análisis multicriterio.

El uso de biocombustibles sólidos puede tener ventajas significativas, como reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir a la sostenibilidad energética al utilizar fuentes de

energía renovables y locales; sin embargo, también es importante considerar los desafíos relacionados con la logística de abastecimiento de biomasa, la falta de capacidad de gestión de los residuos de biomasa y la necesidad de asegurar que los biocombustibles sólidos sean producidos y utilizados de manera sostenible. Asimismo, es importante destacar que la elección de la tecnología adecuada dependerá del tipo de biocombustible sólido utilizado, la escala de producción, el propósito de uso y las condiciones específicas de cada aplicación.

3. COMENTARIOS FINALES

Este manual describe una propuesta metodológica para la evaluación del potencial de los biocombustibles sólidos, sus impactos ambientales y aplicaciones en tecnologías de uso final en países en vías de desarrollo. La propuesta aborda un proceso sistémico que se recomienda para identificar los residuos de biomasa disponibles de manera local, su identificación geográfica y temporal, y que permita estimar el potencial energético disponible a partir de la disposición y caracterización de estos residuos. La metodología es abierta y sujeta a cambios, para adaptarse a diversas adecuaciones donde se desee estudiar la pertinencia de fabricación de biocombustibles sólidos. Es una propuesta inicial que no se limita al contenido propuesto. Para quienes pretenden indagar por primera vez en el ámbito de la bioenergía, esta propuesta es útil para mostrar una ruta de análisis e investigación de residuos de biomasa. También será útil para determinar posibles cadenas de valor energético y de gestión de residuos; incentivando estrategias de economía social y solidaria, así como esquemas de democratización y soberanía energética, para fomentar también el uso de fuentes renovables de

energía a nivel local de manera moderna y sostenible. Algunas de las limitaciones de esta propuesta están en la caracterización de la resistencia mecánica de los biocombustibles que se puedan desarrollar, pero son análisis particulares que dependen del uso de estos recursos. Finalmente, la metodología representa una alternativa para la gestión de biocombustibles sólidos a escala local, vislumbrando los beneficios ambientales, económicos y sociales que estas fuentes pueden generar. Y que con el uso adecuado serán resilientes y asequibles para países marginados y en condiciones de pobreza y pobreza extrema; pues los biocombustibles no sólo proveen beneficios energéticos, representan una tecnología para acortar la brecha de desigualdad y de satisfacción de necesidades básicas.

4. REFERENCIAS

- [1] Ferrandez-Villena M, Ferrandez-Garcia CE, Garcia-Ortuño T, Ferrandez-Garcia A, Ferrandez-Garcia MT. Evaluation of fruit and vegetable containers made from Mulberry wood (*Morus Alba L.*) waste. *Appl Sci* 2019;9. <https://doi.org/10.3390/app9091806>.
- [2] Ramírez-Ramírez MA, Carrillo-Parra A, Ruíz-Aquino F, Hernández-Solís JJ, Pintor-Ibarra LF, González-Ortega N, et al. Evaluation of Selected Physical and Thermal Properties of Briquette Hardwood Biomass Biofuel. *BioEnergy Res* 2022;15:1407–1414. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10391-8>.
- [3] Anca-Couce A, Hochenauer C, Scharler R. Bioenergy technologies, uses, market and future trends with Austria as a case study. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;135:110237. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110237>.
- [4] Zhao L, Sun ZF, Zhang CC, Nan J, Ren NQ, Lee DJ, et al. Advances in pretreatment of lignocellulosic biomass for bioenergy production: Challenges and perspectives. *Bioresour Technol* 2022;343:126123. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126123>.

- [5] Morales-Máximo M, Rutiaga-Quiñones JG, Masera O, Ruiz-García VM. Briquettes from Pinus spp . Residues : Energy Savings and Emissions Mitigation in the Rural Sector. *Energies* 2022;15:3419. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en15093419>.
- [6] Vaidya A, Mayer AL. Use of a participatory approach to develop a regional assessment tool for bioenergy production. *Biomass and Bioenergy* 2016;94:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.08.001>.
- [7] Titus BD, Brown K, Helmisaari HS, Vanguelova E, Stupak I, Evans A, et al. Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines. *Energy Sustain Soc* 2021;11:1–32. <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00281-w>.
- [8] Alvarado Flores JJ, Alcaraz Vera JV, Ávalos Rodríguez ML, López Sosa LB, Rutiaga Quiñones JG, Pintor Ibarra LF, et al. Analysis of Pyrolysis Kinetic Parameters Based on Various Mathematical Models for More than Twenty Different Biomasses: A Review. *Energies* 2022;15:1–19. <https://doi.org/10.3390/en15186524>.

- [9] Medina-Ríos E, Morales-Máximo M, López-Sosa LB, Aguilera-Mandujano A, Corral-Huacuz JC. Life cycle analysis (LCA) of the production of wood waste briquettes from *Pinus* spp.: Case study San Francisco Pichátaro, México. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 2021;912:0–7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/912/1/012011>.
- [10] García-Martínez J, Reyes-patiño JL, López-sosa LB, Fuentes-cortés LF. Anticipating alliances of stakeholders in the optimal design of community energy systems. *Sustain Energy Technol Assessments* 2022;54:102880. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102880>.
- [11] Morales-Máximo CN, López-Sosa LB, Rutiaga-Quiñones JG, Corral-Huacuz JC, Aguilera-Mandujano A, Pintor-Ibarra LF, et al. Characterization of Agricultural Residues of *Zea mays* for Their Application as Solid Biofuel: Case Study in San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. *Energies* 2022;15. <https://doi.org/10.3390/en15196870>.
- [12] Aparicio E, Rodríguez-Jasso RM, Lara A, Loredó-Treviño A, Aguilar CN, Kostas ET, et al. Biofuels production of third generation biorefinery from macroalgal biomass in the

Mexican context: An overview. 2020.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817943-7.00015-9>.

- [13] Rambo MKD, Schmidt FL, Ferreira MMC. Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities. *Talanta* 2015;144:696–703.
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.06.045>.
- [14] Mandal S, Prasanna Kumar G V., Bhattacharya TK, Tanna HR, Jena PC. Briquetting of Pine Needles (*Pinus roxburgii*) and Their Physical, Handling and Combustion Properties. *Waste and Biomass Valorization* 2019;10:2415–24.
<https://doi.org/10.1007/s12649-018-0239-4>.
- [15] Duarah P, Haldar D, Patel AK, Dong C Di, Singhanian RR, Purkait MK. A review on global perspectives of sustainable development in bioenergy generation. *Bioresour Technol* 2022;348:126791.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126791>.
- [16] Morales-Máximo M, García CA, Pintor-Ibarra LF, Alvarado-Flores JJ, Velázquez-Martí B, Rutiaga-Quiñones JG. Evaluation and characterization of timber residues of pinus

spp. as an energy resource for the production of solid biofuels in an indigenous community in Mexico. *Forests* 2021;12. <https://doi.org/10.3390/f12080977>.

- [17] Morales-Máximo M, Ruíz-García VM, López-Sosa LB, Rutiaga-Quiñones J. Exploitation of Wood Waste of *Pinus* spp for Briquette Production : A Case Study in the Community of San Francisco Pich á taro , Michoac á n , Mexico. *Appl Sci* 2020;10:2933. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app10082933>.
- [18] International Energy Agency. International Energy Agency (IEA) World Energy Outlook 2022. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/executive-summary> 2022:524.
- [19] Rutiaga-Quiñones JG, Pintor-Ibarra LF, Orihuela-Equihua R, González-Ortega N, Ramírez-Ramírez MA, Carrillo-Parra A, et al. Characterization of Mexican Waste Biomass Relative to Energy Generation. *BioResources* 2020;15. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.8529-8553>.
- [20] Welfle A, Chingaira S, Kassenov A. Biomass and Bioenergy Decarbonising Kenya ' s domestic & industry Sectors through

bioenergy : An assessment of biomass resource potential & GHG performances. *Biomass and Bioenergy* 2020;142:105757. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105757>.

- [21] Ruiz-García V, Medina P, Vázquez J, Villanueva D, Ramos S, Masera O. Bioenergy Devices: Energy and Emissions Performance for the Residential and Industrial Sectors in Mexico. *Bioenergy Res* 2021. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10362-5>.
- [22] Orozco-Ramírez Q, Cohen-Salgado D, Arias-Chalico T, García CA, Martínez-Bravo R, Masera O. Production and market barriers of solid forest biofuels in Mexico From the enterprises' perspective. *Madera y Bosques* 2022;28:1–15. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812404>.
- [23] Quiñones-Reveles MA, Ruiz-García VM, Ramos-Vargas S, Vargas-Larreta B, Masera-Cerutti O, Ngangyo-Heya M, et al. Assessment of pellets from three forest species: From raw material to end use. *Forests* 2021;12. <https://doi.org/10.3390/f12040447>.
- [24] García C, Masera O. Estado del arte de la

bioenergía en México. 2016.

- [25] López-Sosa LB, García CA. Towards the construction of a sustainable rural energy system: Case study of an indigenous community in Mexico. *Energy Sustain Dev* 2022;70.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.08.022>.
- [26] Larios I, Campos Serrano M de JK, Padilla Sahagún M del C, Villanueva Rodriguez SJ. Introducción a La Tecnología Del Mango. *Introd a La Tecnol Del Mango* 2019:9–10.
- [27] Tiwari G, Sharma A, Sharma S. Saccharification of Mango peel wastes by using microwave assisted alkali pretreatment to enhance its potential for bioethanol production. *World Renew Energy Technol Congr* 2016:1–11.
- [28] López-Sosa LB, Alvarado-flores JJ, Corralhuacuz JC, Aguilera-mandujano A, Rodr RE, Jos S, et al. A Prospective Study of the Exploitation of Pelagic Sargassum spp . as a Solid Biofuel Energy Source. *Appl Sci* 2020;10:1–17.
<https://doi.org/10.3390/app10238706>.
- [29] Khallaf AEM, El-Sebaai A. Review on drying of the medicinal plants (herbs) using solar energy applications. *Heat Mass Transf Und Stoffuebertragung* 2022;58:1411–28.

<https://doi.org/10.1007/s00231-022-03191-5>.

- [30] Egerton RF. Physical Principles of Electron Microscopy. Springer; 2005. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39877-8>.
- [31] Abidi N. FTIR Microspectroscopy: Selected Emerging Applications. 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-84426-4>.
- [32] Edwards HGM. Modern Raman spectroscopy—a practical approach. Ewen Smith and Geoffrey Dent. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, 2005. Pp. 210. ISBN 0 471 49668 5 (cloth, hb); 0 471 49794 0 (pbk). vol. 36. 2005. <https://doi.org/10.1002/jrs.1320>.
- [33] Whan RE. Materials Characterization. Third. United States of America: ASM International; 2004.
- [34] Flores JJA, Quiñones JGR, Rodríguez MLÁ, Vera JVA, Valencia JE, Martínez SJG, et al. Thermal degradation kinetics and FT-IR analysis on the pyrolysis of pinus pseudostrobus, pinus leiophylla and pinus montezumae as forest waste in western Mexico. Energies 2020;13. <https://doi.org/10.3390/en13040969>.

- [35] Alvarado Flores JJ, Alcaraz Vera JV, Ávalos Rodríguez ML, Rutiaga Quiñones JG, Valencia JE, Guevara Martínez SJ, et al. Kinetic, thermodynamic, FT-IR, and primary constitution analysis of *Sargassum* spp from Mexico: Potential for hydrogen generation. *Int J Hydrogen Energy* 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.051>.
- [36] Pintor-Ibarra LF, Carrillo-Parra A, Herrera-Bucio R, López-Albarrán P, Rutiaga-Quiñones JG. Physical and chemical properties of timber by-products from *Pinus leiophylla*, *P. Montezumae* and *P. Pseudostrobus* for a bioenergetics use. *Wood Res* 2017;62:849–61.
- [37] Morales-Máximo M, Orihuela-Equihua R, González-Ortega N, Pintor-Ibarra L., Rutiaga-Quiñones J. Materiales densificados con biomasa forestal como alternativa energética en la comunidad de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México. *Red Mex Bioenergía* 2018;XIV:168–9. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [38] Orihuela, R; Reyes, L.A; Rangel, J.R; Chávez, M.C; Márquez, F; Correa, F; Carrillo, A; Rutiaga JG. Elaboración de briquetas con residuos maderables de pino. In: Rutiaga y

Carrillo, editor. Química los Mater. lignocelulósicos y su potencial bionergético. 1nd ed., 2016, p. Capítulo 11.

- [39] UNE-EN 14774-1. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Parte 1 Humed. Total. AENOR, Madrid, España: 2010, p. 10.
- [40] Correa-Méndez F, Carrillo-Parra A, Rutiaga-Quiñones JG, Márquez-Montesino F, González-Rodríguez H, Jurado-Ybarra E, et al. Contenido de humedad y sustancias inorgánicas en subproductos maderables de pino para su uso en pélets y briquetas. Rev Chapingo, Ser Ciencias For y Del Ambient 2014;20:77–88.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.04.012>.
- [41] Pintor-Ibarra LF, Carrilho-Parra A, Herrera-Bucio R, López-Albarrán P. By-Products From *Pinus Leiophylla*, *P. Montezumae* and *P. Pseudostrobus* for a Bioenergetics Use. Wood Res 2017;62:849–62.
- [42] UNE-EN 14775. Biocombustibles sólidos. In: Asociación Española de Normalización y Certificación, editor. Método para la Determ. del Conten. cenizas. AENOR, Madrid, España: 2010, p. 10.
- [43] Vega-Nieva D, Ortiz L. Biocombustibles

sólidos: Caracterización y normas UNE. Biomasa For. y Bioenergía, 2013, p. 22–6.

- [44] Carrillo-Parra A, Rutiaga J. BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS. Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León; 2020.
- [45] ASTM E872-82. Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels. ASTM Int West Conshohocken 2013.
- [46] Reyes L., Orihuela R, Aviña L., Carrillo A, Pérez E, Rutiaga J. Capítulo 2. Generalidades sobre los biocombustibles. In: Carrillo-Parra A, Rutiaga-Quiñones JG, editors. Biocombustibles sólidos. (1nd ed.), Monterrey, México. Universidad Autónoma de Nuevo León: 2016, p. 33–62.
- [47] García R, Pizarro C, Lavín AG, Bueno JL. Bioresource Technology Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. Bioresource Technol 2012;103:249–58. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.004>.
- [48] Determinación del Poder Calorífico; UNE-EN 14918:2011. Asociación Española de Normalización y Certificación. Asoc. Española Norm. y Certificación, Madrid Spain: 2016.

- [49] Morales-Máximo M. Aprovechamiento del aserrín y viruta de pino (*Pinus spp*) para la producción y evaluación de briquetas, como energía alterna en la comunidad de San francisco Pichátaro, Michoacán. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2019. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e>. 2016.17.58151.
- [50] Demirbas A. Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel* 1997;76:431–4. [https://doi.org/DOI: 10.1016/S0016-2361\(97\)85520-2](https://doi.org/DOI:10.1016/S0016-2361(97)85520-2).
- [51] Cordero T, Marquez F, Rodriguez-Mirasol J, Rodriguez J. Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. *Fuel* 2001;80:1567–71. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00034-5](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00034-5).
- [52] Sheng C, Azevedo JLT. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. *Biomass and Bioenergy* 2005;28:499–507. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.008>.
- [53] Fernández F, Boluda CJ, Olivera J, Guillermo LA, Gómez B, Echavarría E, et al. Análisis Elemental Prospectivo De La Biomasa Algal Acumulada En Las Costas De La República

Dominicana. Rev Cent Azúcar 2017;44:11–22.

- [54] (2008). U-C 15104 E. Determinación del contenido de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Métodos instrumentales [Determination of the content of carbon, hydrogen and nitrogen. Instrumental methods]. Madrid, Spain.: 2008.
- [55] Taylor MJ, Alabdrabalameer, Hassan A, Michopoulos KA, Volpe R, Skoulou V. Augmented Leaching Pretreatments for Forest Wood Waste and Their Effect on Ash Composition and the Lignocellulosic Network. ACS Sustain Chem Eng 2020;8:5674–82.
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c00351>.
- [56] Téllez-Sánchez C, Ochoa-Ruiz HG, Sanjuan-Dueñas R, Rutiaga-Quiñones JG. COMPONENTES QUÍMICOS DEL DURAMEN DE *Andira inermis* (W. Wright) DC. (Leguminosae). Rev Chapingo Ser Ciencias For Y Del Ambient 2010;XVI:87–93.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2099.11.046>.
- [57] Chávez-Rosales JS, Pintor-Ibarra LF, González-Ortega N, Orihuela-Equihua R, Ruiz-Aquino F, Lujan-Álvarez C, et al. Basic Chemical

Composition of Pinus spp. Sawdust from Five Regions of Mexico, for Bioenergetic Purposes. *BioResources* 2021;16:816–24. <https://doi.org/DOI:10.15376/biores.16.1.816-824>.

- [58] Rosas JG, Gómez N, Cara-Jiménez J, González-Arias J, Olego MÁ, Sánchez ME. Evaluation of joint management of pine wood waste and residual microalgae for agricultural application. *Sustain* 2021;13:1–18. <https://doi.org/10.3390/su13010053>.
- [59] Vassilev S V., Baxter D, Andersen LK, Vassileva CG. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel* 2010;89:913–33. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>.
- [60] Núñez CE. ULTRAESTRUCTURA Y TOPOQUÍMICA DE LA PARED CELULAR. *PROCYP* 2004;53:1–17.
- [61] Bernabé-Santiago R, Ávila-Calderón LEA, Rutiaga-Quiñones JG. Componentes químicos de la madera de cinco especies de pino del municipio de Morelia, Michoacán. *Madera Bosques* 2013;19:21–35. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.192338>.
- [62] Goering HK VSP. Forage fiber analyses (apparatus, reagents, procedures and some applications). USDA-ARS. Washington, DC:

agricultural handbook; 1970.

- [63] Musule R, Alarcón-Gutiérrez E, Houbron EP, Bárcenas-Pazos GM, del Rosario Pineda-López M, Domínguez Z, et al. Chemical composition of lignocellulosic biomass in the wood of *Abies religiosa* across an altitudinal gradient. *J Wood Sci* 2016;62:537–47. <https://doi.org/10.1007/s10086-016-1585-0>.
- [64] Orea Igarza U, Carballo Abreu L., Cordero Machado E. Composición química de tres maderas en la provincia de Pinar del Río, Cuba a tres alturas del fuste comercial. Parte N° 2: *Eucalyptus pellita* F. Muell Revista. *Rev Chapingo Ser Ciencias For y Del Ambient* 2004;10:51–5.
- [65] Maria A, Alves M. Mediante Pirólisis Analítica En Madera De *Pinus Caribaea* . Content and Quality Study of the Lignin By Analytical Pyrolysis in *Pinus Caribaea*. *Maderas Cienc y Tecnol* 2007;9:179–88.
- [66] Manals-cutiño E, Penedo-medina M. Análisis Termogravimétrico Y Térmico Diferencial De Diferentes Biomásas Vegetales. *Tecnol Química* 2011;XXXI:36–43. <https://doi.org/10.1590/2224-6185.2011.2.%x>.
- [67] Morales-Máximo M, López-Sosa LB, Rutiaga-

Quiñones JG. Evaluación termográfica de la combustión de briquetas con aglomerante variable de residuos maderables de pino : Análisis comparativo en fogones tradicionales del estado de Michoacán. Sem Nac Energía Sol 2018;XVLL:439–44.

- [68] International-Energy-Agency. CO2 Emissions in 2022. 2023. <https://doi.org/10.1787/12ad1e1a-en>.
- [69] IPCC. Climate change 2014 impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge University Press; 2014.
- [70] IPCC. Part A: Global and Sectoral Aspects. (Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change). Clim Chang 2014 Impacts, Adapt Vulnerability 2014:1132.
- [71] MONROY CCS, CEPEDA VL. Universidad distrital francisco josé de caldas facultad de ingeniería, proyecto cular ingeniería eléctrica. bogotá, colombia 2016 2016:1–79.
- [72] FAO. Unified Bioenergy Terminology 2004:1–50.
- [73] Kaltschmitt M, Thrän D, Smith KR. Renewable Energy from Biomass. Encycl Phys Sci Technol 2003;14:203–28. <https://doi.org/10.1016/b0-12-227410->

5/00059-4.

- [74] Berrueta VM, Edwards RD, Masera OR. Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico. *Renew Energy* 2008;33:859–70. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.016>.
- [75] Masera OR, Díaz R, Berrueta V. From cookstoves to cooking systems: the integrated program on sustainable household energy use in Mexico. *Energy Sustain Dev* 2005;9:25–36. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60480-9](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60480-9).
- [76] Bosque EF, Muneta LM, Rey GR, Suarez B, Berrueta V, Beltrán A, et al. Using design thinking to improve cook stoves development in Mexico. *Sustain* 2021;13:1–12. <https://doi.org/10.3390/su13073843>.
- [77] Masera O, Edwards R, Arnez CA, Berrueta V, Johnson M, Bracho LR, et al. Impact of Patsari improved cookstoves on indoor air quality in Michoacán, Mexico. *Energy Sustain Dev* 2007;11:45–56. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60399-3](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60399-3).
- [78] Morales-Máximo M, Castro Sánchez F.J, Rutiaga-Quiñones J. Estudio socioeconómico

para la evaluación de biocombustibles sólidos: eficiencia energética y alterna en la comunidad de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México. Int ENERGY Conf IEC 2019;2:577–82.

- [79] Sahoo K, Bilek E, Bergman R, Mani S. Techno-economic analysis of producing solid biofuels and biochar from forest residues using portable systems. Appl Energy 2019;235:578–90.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.076>.
- [80] Ajith Kumar J, Vinoth Kumar K, Petchimuthu M, Iyahraja S, Vignesh Kumar D. Comparative analysis of briquettes obtained from biomass and charcoal. Mater Today Proc 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.918>.
- [81] Ghasemi A, Chayjan RA. Optimization of Pelleting and Infrared-Convection Drying Processes of Food and Agricultural Waste Using Response Surface Methodology (RSM). Waste and Biomass Valorization 2019;10:1711–29.
<https://doi.org/10.1007/s12649-017-0178-5>.
- [82] Ruiz-García VM, Huerta-Mendez MY, Vázquez-Tinoco JC, Alvarado-Flores JJ,

Berrueta-Soriano VM, López-Albarrán P, et al. Pellets from Lignocellulosic Material Obtained from Pruning Guava Trees: Characterization, Energy Performance and Emissions. *Sustain* 2022;14. <https://doi.org/10.3390/su14031336>.

- [83] Morales-Máximo M, Rutiaga-Quiñones JG. Aprovechamiento del aserrín de pino para la producción de briquetas como energía alterna: caracterización térmica y análisis de durabilidad por masa presente en la combustión. *Sem Nac Energía* 2018;XVLL:420–5.
- [84] Morales-Máximo M, García-Bustamante CA, Castro-Sánchez FJ, Raya Gonzalez D, Cruz de León J, Pintor-Ibarra LF, et al. Producción de briquetas a partir de residuos maderables de *Pinus spp.*, para su aplicación en un secador de madera. *Memorias Del XV Congr Nac Cienc Tecnol e Innovación ICTI 2020*;15:1–6.
- [85] Núñez J, Beltrán A. “Evaluación de la eficiencia térmica y del ciclo de vida de una estufa de biomasa.” *MEMORIAS DEL XXV Congr Int Anu LA SOMIM 1 2019*:18–21.
- [86] González-Barragán I, López Torres D, Alonso MÁ, Arias M. Aprovechamiento energético de sarmiento en calderas de biomasa mediante peletizado. 2007.

- [87] Plaza Delgado E, Jaramillo Peralta J, Arevalo Quinto A, Aguila Avila W. Design of a Dryer for cereals that uses as an energy source solid biomass- electric source. Congr Int I+D+i En Sostenibilidad Energética 2019 2019.
- [88] Guerrero Casas FM, Carazo AF. Localización de centrales de generación de energía eléctrica a partir de Biomasa procedente del olivar. Rev Estud Reg 2005;74:153–75.
- [89] Ortiz L, Tejeda A, Vázquez A, Piñeiro Veiras G. Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria. Rev CIS-Madera 2008;1:17–32.
- [90] Pérez J, Borge D, Agudelo J ohn. Biomass gasification process: theoretical and experimental studies a review. Rev Fac Ing 2010:95–107.
- [91] Ávalos-Betancourt CA, López-Sosa LB, Morales-Máximo M, Aguilera-Mandujano A, Corral-Huacuz JC, Rodríguez-Martínez RE. Assessment of the energy potential as a solid biofuel of Sargassum spp. considering sustainability indicator. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., vol. 912, IOP Publishing Ltd; 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/912/1/012010>.
- [92] M. LL-S& M-M. Vinculación, Innovación Y Diseño Para El Desarrollo De Proyectos

Ecotecnológicos. 2022.