

Energy potential of agricultural residues in Peru for use in thermochemical processes

Estela Assureira, Mg.¹, Marco Assureira, Ing.²

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

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

Abstract-- In the challenge of achieving a decarbonized, sustainable and fair economy, the use of indigenous biomass resources must be considered as a source of energy. In Peru, despite the enormous energy potential that residues from agricultural activities represent, these are not considered, thus 75% of primary energy production in 2019 came from fossil fuel sources.

The research work carried out presents the energy potential at the departmental level in Peru of agricultural residues that can be used via thermochemical processes with a high degree of maturity. The work included the analysis of agricultural production at the national, departmental and provincial levels; identification of raw material requirements for thermochemical conversion processes; and the design of a methodology for the analysis, selection and quantification of agricultural residues with energy potential, considering the following aspects: volumes generated, geographical location, characteristics that the residues must have for their energy use, alternative uses and environment impact of their use.

The crops whose residues were identified with high energy potential and possibilities for their use were bananas (41.5%), sugar cane (28.4%), rice (20.3%), corn (5.6%), oil palm (2.0 %), cotton (1.0%), coffee (0.8%) and cocoa (0.4%); the selected residues of these crops were stems, gin residues and cottonseed hulls; rice straw and husks; sugar cane bagasse and straw; pulp, silver husk and parchment of coffee; cocoa outer shell; straw and cob of hard yellow corn; banana pseudo-stem and leaves; and leaves, tusa, shell and fiber of the oil palm.

The estimated total theoretical energy potential from agricultural residues, at the national level, amounts to 304.9 million GJ and the departments with the highest energy concentration were La Libertad (15.3%), San Martín (14.46%), Piura (13.1%) and Lambayeque (8.7%).

Keywords– Agricultural waste, Thermochemical process, Heating value, Bioenergy.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.670>
ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

Potencial energético de residuos agrícolas en el Perú para su aprovechamiento en procesos termoquímicos

Estela Assureira, Mg.¹, Marco Assureira, Ing.²

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

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

Resumen— En el desafío de lograr una economía descarbonizada, sostenible y justa, el uso de los recursos biomásicos autóctonos deben ser considerados como fuente de energía. En el Perú pese al enorme potencial energético que representan los residuos de las actividades agrícolas estos no son considerados, así el 75% de la producción de energía primaria en el año 2019 provino de fuentes de combustibles fósiles.

El trabajo de investigación realizado presenta el potencial energético a nivel departamental de los residuos agrícolas susceptibles de ser aprovechados vía procesos termoquímicos con alto grado de madurez.

El trabajo comprendió el análisis de la producción agraria a nivel nacional, departamental y provincial; la identificación de los requerimientos de las materias primas para los procesos de conversión termoquímica; y el diseño de una metodología para el análisis, selección y cuantificación de los residuos agrícolas con potencial energético la cual, consideró los siguientes aspectos: volúmenes generados, localización geográfica, características que deben de poseer los residuos para su aprovechamiento energético, usos alternos e impacto ambiental de su empleo.

Los cultivos cuyos residuos fueron identificados con alto potencial energético y posibilidades de aprovechamiento fueron el plátano (41.5%), la caña de azúcar (28.4%), el arroz (20.3%), el maíz (5.6%), la palma aceitera (2.0%), el algodón (1.0%), el café (0.8%) y el cacao (0.4%); siendo los residuos seleccionados de estos cultivos tallos, residuos del desmotado y cascarilla de la semilla del algodón; paja y cascarilla de arroz; bagazo y paja de caña de azúcar; pulpa, cascarilla plateada y pergaminio del café; cáscara externa del cacao; paja y coronta del maíz amarillo duro; seudotallo y hojas del banano; y hojas, tusa, cuesco y fibra de la palma aceitera.

El potencial energético total teórico estimado proveniente de residuos agrícolas, a nivel nacional, asciende a 304.9 millones de GJ, siendo los departamentos con mayor concentración energética La Libertad (15.3%), San Martín (14.46%), Piura (13.1%) y Lambayeque (8.7%).

Palabras clave— Residuo agrícola, Proceso termoquímico, Poder calorífico, Bioenergía.

Abstract-- In the challenge of achieving a decarbonized, sustainable and fair economy, the use of indigenous biomass resources must be considered as a source of energy. In Peru, despite the enormous energy potential that residues from agricultural activities represent, these are not considered, thus 75% of primary energy production in 2019 came from fossil fuel sources.

The research work carried out presents the energy potential at the departmental level in Peru of agricultural residues that can be

used via thermochemical processes with a high degree of maturity. The work included the analysis of agricultural production at the national, departmental and provincial levels; identification of raw material requirements for thermochemical conversion processes; and the design of a methodology for the analysis, selection and quantification of agricultural residues with energy potential, considering the following aspects: volumes generated, geographical location, characteristics that the residues must have for their energy use, alternative uses and environment impact of their use.

The crops whose residues were identified with high energy potential and possibilities for their use were bananas (41.5%), sugar cane (28.4%), rice (20.3%), corn (5.6%), oil palm (2.0 %), cotton (1.0%), coffee (0.8%) and cocoa (0.4%); the selected residues of these crops were stems, gin residues and cottonseed hulls; rice straw and husks; sugar cane bagasse and straw; pulp, silver husk and parchment of coffee; cocoa outer shell; straw and cob of hard yellow corn; banana pseudo-stem and leaves; and leaves, tusa, shell and fiber of the oil palm.

The estimated total theoretical energy potential from agricultural residues, at the national level, amounts to 304.9 million GJ and the departments with the highest energy concentration were La Libertad (15.3%), San Martín (14.46%), Piura (13.1%) and Lambayeque (8.7%).

Keywords— Agricultural waste, Thermochemical process, Heating value, Bioenergy.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la economía global ha incrementado la demanda de energía en todos los sectores y regiones, lo que acelera el cambio climático. La sustitución de la energía proveniente de los combustibles fósiles por fuentes de energía alternativas con bajas emisiones de carbono podría ser una solución viable para hacer frente a la creciente demanda de energía y lograr la seguridad energética.

Las energías renovables como la energía eólica y la energía solar, producen energía de alta calidad y requieren de un bajo costo de capital por lo cual, juegan un papel esencial en las micro-redes [1]. Sin embargo, estos recursos sufren de intermitencia de la naturaleza. La biomasa a diferencia de los recursos solares y eólicos, es una opción de energía alternativa prometedora y confiable [1]. La biomasa puede almacenarse y utilizarse para generar electricidad o calor, transformarse en combustibles para su empleo en el transporte y en diversos insumos para la industria. La transición de una sociedad basada en fósiles a una basada en biotecnología convierte a la biomasa en un insumo muy importante en la actividad económica. Este nuevo enfoque sigue los objetivos de

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.670>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

crecimiento sostenible al conectar múltiples sectores (agricultura, alimentación, silvicultura, energía, gestión de residuos e industria química) para el reciclaje, la recuperación y la circularidad [2].

La biomasa puede definirse como la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias y ganaderas, de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biológica degradable de los residuos industriales y municipales. Además, atendiendo a diferentes aspectos la biomasa se clasifica por su origen (natural, residual o cultivos energéticos), su composición (amilácea, lignocelulósica, oleaginosa o alcolígena) y según su estado (sólido, líquido, gaseoso) [3].

Los residuos agrícolas conformados por las pajas de cereales, los zuros de maíz, excedentes agrícolas, los residuos de las industrias azucareras, arroceras, de producción de aceites, pertenecen a la categoría de biomasa residual seca. Estos residuos tienen pocas posibilidades de ser incorporados al ciclo productivo que los generó, de ser empleados en otros procesos, por lo que son quemados o vertidos a botaderos. Los impactos ambientales negativos que se generan debido a estas prácticas de eliminación, son motivo de gran preocupación para investigadores, gobernantes, organizaciones sociales y por ello, se buscan métodos para gestionarlos de modo integral y sostenido. En este escenario, lo primero es cambiar el enfoque o visión de ver a hojas, ramas, raíces, cáscaras, pepas, bagazo, entre otros residuos biomáticos como desechos, o sea como materiales carentes de valor, cuyo único destino es su eliminación. Si bien, no tienen aplicación directa en la actividad que lo ha generado, sí pueden ser empleados en otro proceso o bien en el mismo luego de alguna transformación.

El aprovechamiento energético de la biomasa residual agrícola es complejo y demanda el análisis del proceso de generación; la cuantificación de los volúmenes generados, disponibles y aprovechables; la determinación de su localización geográfica; el conocimiento de sus características, de los requerimientos que plantea su empleo con la tecnología de conversión escogida y, de los usos alternos no energéticos.

Enormes volúmenes de hojas, ramas, raíces generan las labores de cosecha, estos residuos quedan esparcidos en el campo, y sólo una fracción muy pequeña de ellos se incorpora al suelo, el resto debe ser eliminado para evitar la proliferación de diversos vectores (ratas, plagas, etc.). Las plantas de procesamiento también son fuente generadora de residuos como cáscaras, pepas, mucílago, efluentes etc. donde también su manejo resulta un problema. La Fig. 1 muestra los residuos generados por el cultivo del arroz en el campo durante la cosecha así como en el molino [4].

El aprovechamiento de la biomasa residual agrícola demanda un claro entendimiento del término potencial, el cual es función de la disponibilidad de biomasa, que a menudo depende de condiciones físicas, técnicas, económicas y ambientales. Existen tres tipos de potencial: teórico, técnico y económico. Potencial teórico, expresado en Joule (J), es la cantidad máxima de biomasa teóricamente disponible con

fines energéticos, excluida la biomasa para alimentos y material industrial. El potencial técnico, representa la fracción del potencial teórico disponible para la producción de energía en las condiciones actuales, considerando la tecnología de conversión de energía, la eficiencia de conversión, restricciones ambientales y legales. Por lo tanto, sólo puede explotarse una parte del potencial energético teórico.

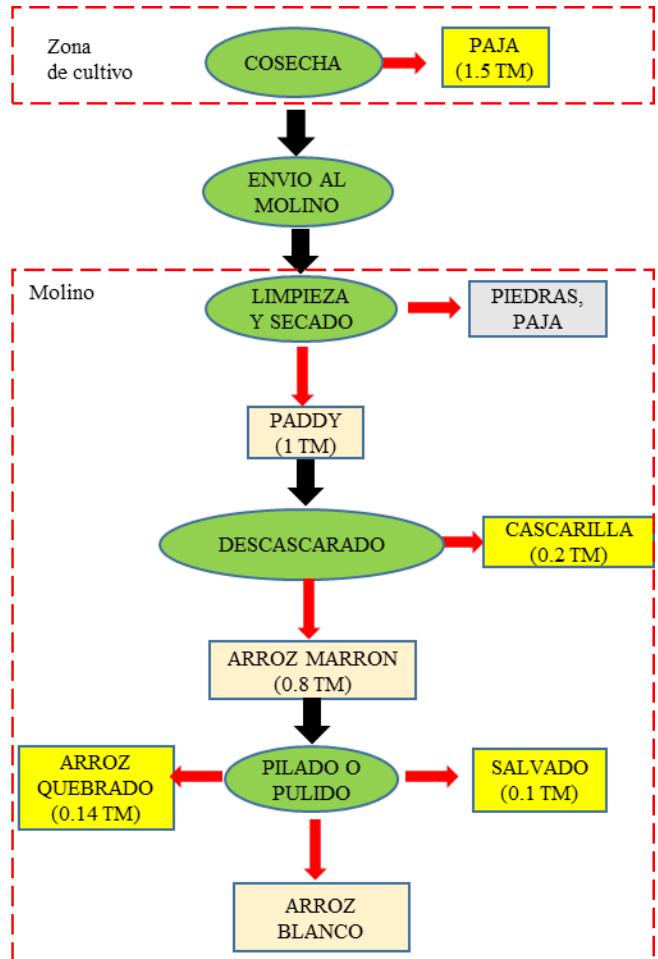


Fig. 1 Arroz: Residuos generados

El potencial económico, es una parte del potencial técnico, que considera los criterios de rentabilidad dentro de un marco dado. Aspectos financieros como costo-beneficio y precio de la energía son utilizados para evaluar el potencial económico. La Fig. 2 muestra la relación entre los distintos conceptos de potencial señalados [1].

Las tecnologías de conversión energética de la biomasa abarcan procesos simples que datan de los albores de la humanidad (la tala de árboles y su posterior quema) hasta procesos más complejos como la hidrólisis. Las rutas de la conversión de la biomasa energía son transesterificación, procesos termoquímicos y procesos bioquímicos.

Los niveles de desarrollo alcanzado por las tecnologías existentes son diversos, algunas son conocidas y han logrado un grado de madurez que las convierte en altamente

competitivas con otras fuentes de energía, otras han logrado demostrar su factibilidad técnica y se hallan en la etapa piloto para lograr su posterior aplicación comercial. Finalmente, existen un conjunto de tecnologías que se encuentran en la etapa de investigación y desarrollo como se indica en la Fig. 3 [5].

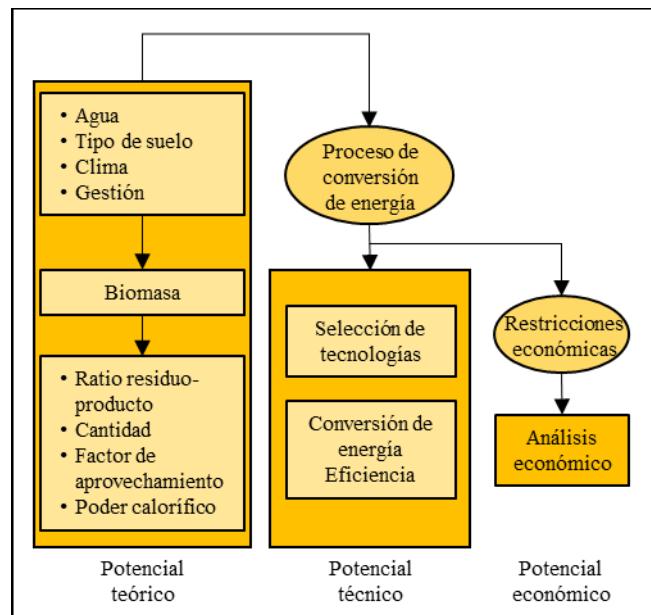


Fig. 2 Potencial teórico, técnico y económico de aprovechamiento de los residuos agrícolas

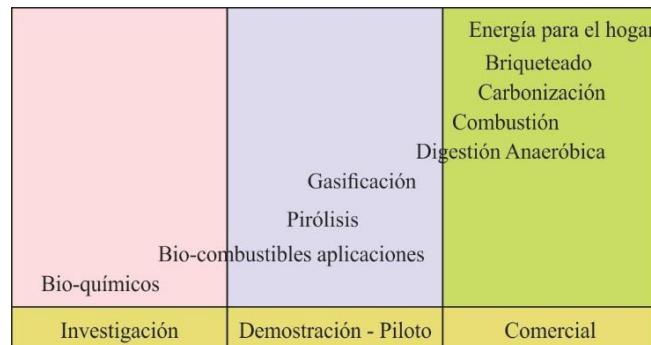


Fig. 3 Nivel de las tecnologías de aprovechamiento

La caracterización de los residuos agrícolas consiste en la determinación de sus propiedades físicas, químicas y energéticas, siendo un paso indispensable para su aprovechamiento energético pues indica la calidad de la materia prima, los procesos de adecuación o pre-tratamiento a que debe de ser sometida previo a su empleo, los residuos y las emisiones que generará el proceso de aprovechamiento energético. Las propiedades físicas a determinar son: la densidad aparente y de partícula, el tamaño y forma, la humedad, la durabilidad mecánica y la distribución granulométrica. Estas propiedades son requeridas para la selección y diseño de los equipos de almacenamiento y transporte y determina además los procesos de pre-tratamiento

de reducción de humedad y tamaño [6]. Considerando el empleo de la biomasa como fuente de energía se recomienda trabajar con valores de humedad no mayores al 20% [7], mayores valores causan inestabilidad y disminuyen el rendimiento, pues parte de la energía se utiliza en la evaporación.

Otro aspecto importante en los procesos de combustión son los problemas de formación de escorias y ensuciamiento en las paredes de la cámara de combustión, que depende de la composición de las cenizas. La predicción de estos fenómenos se realiza mediante el cálculo de índices de escorificación y ensuciamiento, cuyos valores dependen de los porcentajes de óxidos de sodio, potasio, fierro, aluminio, calcio y titanio presentes en las cenizas [7].

El comportamiento de la biomasa en los procesos de transformación termoquímica, el tipo y nivel de emisiones generados se determina a partir de composición de la biomasa para lo cual se requiere aplicar el análisis inmediato, el análisis elemental y de composición de las cenizas. La cantidad de energía aprovechable depende del poder calorífico de la biomasa residual [6].

El Perú cuenta con una población que supera los 30 millones de habitantes, posee un índice de desarrollo humano de 0.741 [8] y presenta una fuerte dependencia de los combustibles fósiles como fuente de energía. Según el Balance Nacional de Energía del año 2019, la producción de energía primaria fue de 1,114.35 millones de TJ, de los cuales el 75% de la producción correspondió a los combustibles fósiles siendo insuficiente para satisfacer el consumo interno debiéndose importar 238 millones de petróleo [9]. El efecto de todo esto fue la emisión 2.5 TM/h de CO₂ equivalente [10]. Por lo tanto, urge acelerar un cambio gradual en la matriz energética nacional, e ir hacia las energías limpias como la biomasa, para lograr un crecimiento sustentable y descentralizado.

En el Perú la actividad agrícola es muy importante pues contribuye con el 7.3% del PBI [11], y es fuente de empleo para más de 4.7 millones personas. Se cultivan regularmente más de 146 productos superando los 37 millones de TM y, como resultado de la actividad agrícola, se generan residuos que tienen escasas aplicaciones por lo que son quemados generando contaminación e incendios. Actualmente, la quema como práctica de eliminación se encuentra prohibida por ley y los entes generadores deben de buscar alternativas que den salida a sus residuos [12].

El trabajo realizado es el primer paso en la valorización energética de los residuos agrícolas en el Perú, pues presenta el potencial teórico energético a nivel departamental de los residuos agrícolas susceptibles de ser aprovechados en procesos de combustión, gasificación y transformación en biocombustibles sólidos. La gran variedad de cultivos agrícolas y de residuos generados demandó la necesidad seleccionar los residuos con mayor potencial energético, actividad que fue ejecutada aplicando Metodología de

Criterios para la Estimación de Residuos Agrícolas con Potencial Energético para Procesos Termoquímicos (CERA), un método multicriterio desarrollado sobre la base de información existente en la literatura presentada por Assureira E. y Assureira M., 2014 [13]. Los resultados obtenidos se presentan a través de cuadros estadísticos que han servido de base para elaborar los mapas que conforman el Atlas Energético de Biomas a Residual Agrícola del Perú 2022.

II. METODOLOGÍA

La investigación desarrollada valoriza energéticamente a los residuos agrícolas del Perú a nivel departamental y provincial con mayor potencial para su aprovechamiento vía procesos termoquímicos.

El trabajo se inicia con la identificación de los requerimientos de los residuos para su empleo en procesos de conversión termoquímica; seguidamente se diseña una metodología para el análisis y selección de residuos agrícolas con potencial energético. La siguiente etapa fue el análisis de la producción agraria y la selección de cultivos cuyos residuos serían estudiados. A continuación, se caracterizaron los residuos de los cultivos seleccionados en la etapa anterior. La selección final se realizó aplicando la metodología desarrollada CERA. Finalmente, se llevó a cabo la estimación de los volúmenes de residuos generados susceptibles de ser usados así como de la cantidad de energía disponible a nivel nacional y departamental.

A. Metodología para la selección de residuos agrícolas

La metodología desarrollada ha considerado aspectos de naturaleza cuantitativa y cualitativa (ver Tabla I y Tabla II) que permiten analizar el potencial de un residuo para su empleo en procesos termoquímicos. A cada criterio se le ha asignado una ponderación como se muestra en la Tabla III. La puntuación total que puede obtener un residuo se determina mediante (1) siendo el valor máximo obtenible de 116.

$$W = \sum_{i=1}^n A_i * B_i \quad (1)$$

donde:

n : número total de criterios (criterios =14)

A: ponderación del criterio (1 – 3)

B: calificación obtenida por el residuo por su compatibilidad energética en el criterio analizado (0 – 4)

TABLA I

CRITERIOS CUANTITATIVOS			
Código	Criterio	Rango	Valor
C-01	Producción del cultivo de origen (TM)	50,000 - 200,000	1
		2'000,000 - 200,000	2
		6'000,000 - 2'000,000	3
		> 6'000,000	4
C-02	Rendimiento por hectárea (TM/ha)	0.5 - 3	1
		3.0 - 15.0	2

C-03	Ratio de residuo para aprovechamiento termoquímico vs. Cultivo	15.0 - 50.0	3
		> 50	4
		< 1	1
		1 - 2	2
C-4	Número de cultivos por año	> 2 - 3	3
		> 3	4
		0.5	1
C-5	Poder calorífico (MJ/kg)	1	2
		2	3
		>2	4
C-6	Usos alternos	10 - 13	1
		13 - 16	2
		16 - 18	3
		> 18	4

TABLA II
CRITERIOS CUALITATIVOS

Código	Criterio	Descripción	Valor
C-6	Usos alternos	Fertilizante, material de construcción, alimento para el ganado	1
		Fertilizante y material de construcción	2
		Fertilizante	3
		Ningún uso	4
C-07	Facilidad de recolección y transporte	Residuos muy dispersos	1
		Residuos confinados en el área de cultivo	2
		Residuos en planta de procesamiento pero con poca fluidez	3
		Residuos en planta de procesamiento pero con alta fluidez	4
		Ninguna	1
C-08	Asociatividad y organización de los productores	Escaso nivel	2
		Mediano nivel	3
		Alto nivel	4
C-09	Facilidad de almacenamiento	Muy difícil	1
		Existen dificultades	2
		Reducida dificultad	3
		Ninguna dificultad	4
C-10	Impacto ambiental de su recolección	Empeora	1
		Ninguna mejora	2
		Mejora	3
		Muchas mejoras	4
C-11	Impacto ambiental de su eliminación	Empeora	1
		Ninguna mejora	2

C-12	Facilidad para definir la propiedad del residuo	Mejora	3
		Muchas mejoras	4
		Disputa de la propiedad	1
		Dificultad de definir la propiedad	2
C-13	Distancia entre el centro de generación y los posibles lugares de uso	No hay mucha claridad	3
		Bien definida	4
		Remoto	1
		Lejos	2
C-14	Compatibilidad para su empleo en procesos de aprovechamiento termoquímicos	Cerca	3
		Muy cerca	4
		Escasa compatibilidad	1
		Leve	2
		Mediana	3
		Alta compatibilidad	4

TABLA III
PESO DE LOS CRITERIOS

Criterio	Peso	Criterio	Peso
C-01	3	C-08	3
C-02	2	C-09	1
C-03	2	C-10	2
C-04	2	C-11	3
C-05	3	C-12	1
C-06	2	C-13	2
C-07	1	C-14	2

B. Análisis de la producción agraria y selección de cultivos

Se realizó el análisis de la producción agraria y rendimiento por hectárea correspondiente al periodo comprendido entre el año 2015 al 2019 que publica el Ministerio de Agricultura y Riego del Perú a nivel nacional y departamental [14], identificándose un total de 146 cultivos de los cuales se seleccionaron 16 cultivos como los más significativos.

C. Estudio de los residuos de los cultivos seleccionados

Se analizó el ciclo productivo correspondiente a cada uno de los 16 cultivos seleccionados identificándose los residuos generados en cada etapa. Se levantó información sobre ratios de generación, aplicaciones, propiedad de residuos, impactos, localización y características energéticas para lo cual se aplicaron las siguientes pruebas: análisis inmediato (ASTM D7582), análisis elemental (ASTM D5373), contenido de azufre (ASTM D4239), poder calorífico (ASTM D5865), análisis de cenizas (ASTM D4326 - 13), pérdida al fuego (ASTM C25-17).

D. Selección de los residuos con potencial energético

Se procedió a seleccionar los residuos correspondiente a los 16 cultivos aplicando la metodología desarrollada CERA.

E. Determinación del volumen y del potencial energético aprovechable

Haciendo uso de la información de la producción agraria correspondiente a los cultivos seleccionados y los ratios de generación de residuos se determinó el volumen de residuos generados a nivel departamental y provincial. En esta etapa se tuvo en consideración los porcentajes de empleo del residuo en otras aplicaciones así como las pérdidas que se generaría en las operaciones de recolección y transporte. La ecuación (2) se emplea para realizar esta estimación.

$$Rwt = TCP * F * (1-E)*(1-G) \quad (2)$$

donde:

Rwt : cantidad total del residuo disponible (TM)

TCP : Producción anual del cultivo (TM)

F : ratio de generación del residuo

E : porcentaje correspondiente a usos no energéticos

G : porcentaje de pérdidas

Finalmente, se determina el potencial de energético aplicando (3).

$$Re = Rwt * PCS \quad (3)$$

donde:

Re : energía total disponible

Rwt : cantidad total del residuo disponible (TM)

PCS : Poder calorífico del residuo (GJ/TM)

III. RESULTADOS

A. Análisis de la producción agraria y selección de residuos

De 146 cultivos analizados fueron seleccionados 16 por su volumen y rendimiento por hectárea. La relación se indica en la Tabla IV.

TABLA IV
PRODUCCIÓN AGRARIA A NIVEL NACIONAL

Cultivo	Producción anual (TM)	Participación
Otros cultivos	14,721,366	39.1%
Caña de azúcar para azúcar	10,908,494	29.0%
Arroz cáscara	3,188,306	8.5%
Plátano	2,280,103	6.1%
Maíz amarillo duro	1,271,825	3.4%
Caña de azúcar para etanol	988,489	2.6%
Palma aceitera	912,929	2.4%
Caña de azúcar para alcohol	712,303	1.9%
Uva	638,204	1.7%

Maíz choclo	421,870	1.1%
Espárrago	366,758	1.0%
Café pergaminio	363,291	1.0%
Maíz amiláceo	307,970	0.8%
Aceituna	190,986	0.5%
Trigo	190,560	0.5%
Cacao	135,928	0.4%
Algodón rama	58,308	0.2%
Total	37,657,690	100.0%

Arroz	paja y cascarilla
Caña de azúcar	bagazo y paja
Café	pulpa, cascarilla plateada y pergaminio
Cacao	cáscara externa
Maíz amarillo duro	paja y coronta
Plátano	tronco, seudo tallo y hojas
Palma	hojas, tusa, cuesco y fibra

B. Residuos seleccionados aplicando la metodología CERA

Los resultados del estudio correspondiente a cada uno de los cultivos y sus residuos aplicando la metodología CERA se muestran en la Tabla V.

TABLA V
CALIFICACIÓN DE LOS CULTIVOS POR CRITERIO

Criterio	Arroz	Caña de azúcar	Algodón	Maíz amarillo duro	Café	Cacao	Palma aceitera	Plátano
C-01	3	4	1	2	2	1	2	3
C-02	3	4	2	3	1	1	2	2
C-03	2	1	4	3	1	1	1	4
C-04	3	3	3	3	3	3	3	3
C-05	3	4	4	3	4	4	3	2
C-06	3	2	2	2	3	3	3	3
C-07	4	3	4	3	3	3	3	2
C-08	3	3	3	1	3	3	3	3
C-09	3	2	3	3	3	3	2	2
C-10	4	4	3	3	3	3	3	4
C-11	4	4	3	3	3	3	3	3
C-12	3	4	4	2	3	4	4	3
C-13	4	3	3	2	3	3	3	3
C-14	4	4	3	3	3	3	3	3

La puntuación total obtenida por cada cultivo se indica en la Tabla VI, mientras que la Tabla VII indica los residuos seleccionados de cada cultivo.

TABLA VI
CALIFICACIÓN DEL CULTIVO

Cultivo	Arroz	Caña de azúcar	Algodón	Maíz amarillo duro	Café	Cacao	Palma aceitera	Plátano
	95	96	84	76	79	77	78	84

TABLA VII
RESIDUOS SELECCIONADOS

Cultivo	Residuo seleccionado
Algodón	tallos, residuos del desmotado y cascarilla de la semilla

C. Potencial energético de los residuos seleccionados

La Tabla VIII muestra los resultados de la cuantificación de los residuos con mayor potencial energético en el Perú.

TABLA VIII
POTENCIAL DE LOS RESIDUOS GENERADOS

Residuos del cultivo	Volumen en TM/año	Energía disponible GJ/año
Arroz	5,454,850	61,905,483
Plátano	13,362,648	126,544,277
Caña de azúcar	6,481,170	86,604,570
Café	169,197	2,449,418
Cacao	106,079	1,308,390
Maíz amarillo duro	1,548,253	17,093,175
Palma aceitera	490,946	6,187,851
Algodón	186,327	2,828,431
Total nacional	27,799,469	304,921,593

D. Potencial energético del total de residuos seleccionados a nivel departamental

La Tabla IX se presenta el potencial energético disponible a nivel departamental y la Fig. 4 muestra la localización geográfica de los cultivos seleccionados así como potencial energético de los departamentos más significativos.

TABLA IX
POTENCIAL ENERGÉTICO DEPARTAMENTAL

Departamento	Volumen en TM/año	Energía disponible GJ/año
Amazonas	1,764,253	18,029,227
Ancash	879,502	10,909,504
Apurímac	9,756	109,134
Arequipa	511,031	5,891,863
Ayacucho	16,106	173,311
Cajamarca	669,269	7,408,477

Cuzco	221,804	2,206,758
Huancavelica	5,036	51,708
Huánuco	1,461,463	14,116,900
Ica	361,243	4,362,061
Junín	1,263,018	12,274,748
La Libertad	3,611,198	46,523,521
Lambayeque	2,122,089	26,675,483
Lima	970,533	12,543,123
Loreto	2,134,164	21,299,909
Madre de Dios	241,860	2,352,038
Moquegua	321	3,464
Pasco	455,578	4,368,217
Piura	3,756,786	39,856,222
Puno	<u>81,206</u>	<u>797,879</u>

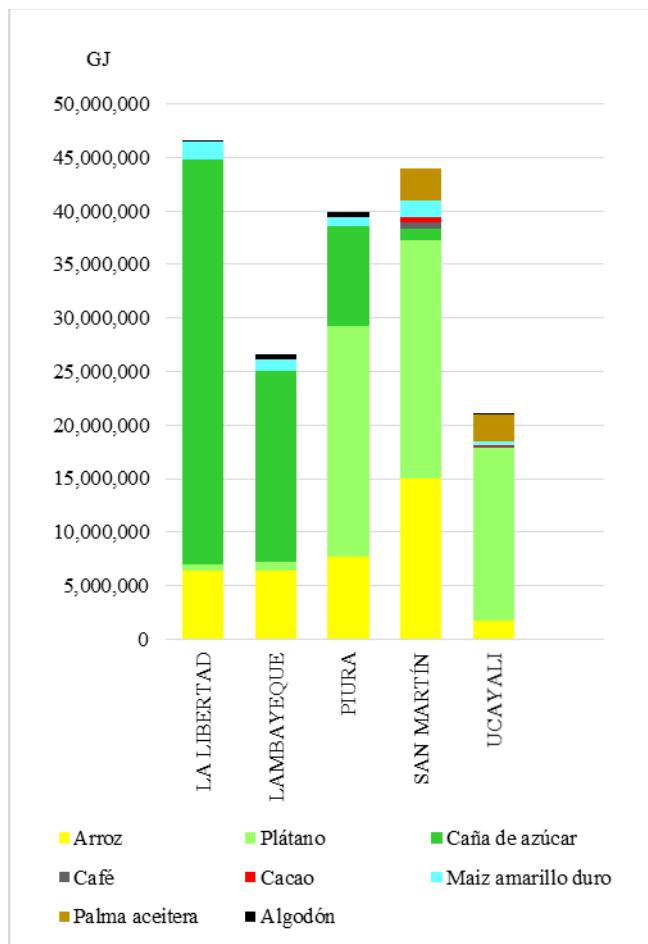


Fig. 4 Potencial energético de los departamentos más significativos

IV. CONCLUSIONES

1. La energía significa desarrollo y mejor calidad de vida, la bionergía en el Perú es una alternativa energética viable, amigable con el medio ambiente y versatil. Los residuos agrícolas brindan esta oportunidad, sin competir con la alimentación y dando salida al problema que hoy representa su acumulación, para ello es preciso conocer las posibilidades existentes que se resumen en qué residuos son adecuados, donde se encuentran y qué volúmen esta disponible. Este trabajo se puede considerar como el punto de partida para el desarrollo de proyectos energéticos en torno a la biomasa.
2. CERA, es la metodología desarrollada y aplicada para la identificación de los los residuos agrícolas como fuente de energía. CERA comprende de un conjunto de 14 criterios cuantitativos y cualitativos ponderados que toman en consideración el volúmen, los ratios de generación, la localización, las actividades de recolección, transporte y almacenamiento, las características energéticas, el impacto de eliminación del residuo, el nivel de madurez de la tecnología de aprovechamiento energético y los usos alternos.
3. En el Perú, los cultivos cuyos residuos poseen un alto potencial energético y que presentan posibilidades de aprovechamiento en procesos de combustión y gasificación son el plátano (41.5%), la caña de azúcar (28.4%), el arroz (20.3%), el maíz (5.6%), la palma (2%), el algodón (1%), el café (0.8%) y el cacao (0.4%).
4. El volumen estimado de residuos disponibles anualmente asciende a 27.8 millones de toneladas métricas, lo que significa un potencial energético teórico que asciende a 304.9 millones de GJ, siendo los departamentos con mayor potencial energético identificados La Libertad (15.3%), San Martín (14.46%), Piura (13.1%) y Lambayeque (8.7%).

REFERENCIAS

- [1] L. La Picirelli de Souza *et al.*, "Theoretical and technical assessment of agroforestry residue potential for electricity generation in Brazil towards 2050," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 2574–2587, 2021.
- [2] European Commission Directorate-General for Research and Innovation, "A sustainable Bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, society and the environment : updated bioeconomy strategy" *Publications Office*, 2018, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/478385>.
- [3] A. I. Lucas Herguedas, C. del Peso. Taranco, E. Rodríguez García, y P. Prieto Paniagua, "Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad", *Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. ITAGRA.CT*, Madrid - España, 2012.
- [4] C. A. M. Moraes *et al.*, "Review of the rice production cycle: By-products and the main applications focusing on rice husk combustion and ash recycling," *Waste Manag. Res.*, vol. 32, no. 11, pp. 1034–1048, 2014.
- [5] United Nations Environmental Programme, "Technologies for converting waste agricultural biomass to energy," pp. 1–212, 2013.
- [6] J. Cai *et al.*, "Review of Physicochemical Properties and Analytical Characterization of Lignocellulosic Biomass", *Renew. Sustain.*

Energy Rev., pp. 309 - 322, 2017.

- [7] F. Sebastián Nogués, D. García-Galindo, A. Rezeau, "Energía de la biomasa", edición 1, pp 1 - 557, Zaragoza - España, 2010.
- [8] M. Irfan *et al.*, "Assessing the energy dynamics of Pakistan: Prospects of biomass energy," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 80–93, 2020.
- [9] Ministerio de Energía y Minas, "Balance Nacional de la Energía 2019", <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/1902937-balance-nacional-de-energia-2019>.
- [10] P. Gamio, "Transición energética: Un cambio necesario en el Perú," *Pluriversidad*, vol. 1, no. 1, pp. 179–191, 2018.
- [11] Banco Mundial, "Tomando Impulso en la Agricultura Peruana," *Banco Mundial*. Washington, D. C., p. 224, 2017.
- [12] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, "Reglamento de gestión integral de residuos sólidos del sector agricultura y riego", <https://www.gob.pe/midagri> (2019).
- [13] E. Assureira and M. Assureira, "Biomass Residual Energy Potential in Peru," in *Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, 2014.
- [14] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, "Anuario Estadístico de Producción Agrícola 2015-2019", <https://www.gob.pe/midagri>.