

1^{ra} edición

Estudios sobre Economía Circular e Industria 4.0

I Congreso Internacional de Ingeniería Industrial Aplicada
23, 24 y 25 de mayo del 2023, Guayaquil, Ecuador.

Tema 1

**Análisis del potencial de la biomasa residual para
generación eléctrica en países de la cuenca amazó-
nica.**

Daniel Ortega Pacheco

Escuela Superior Politécnica del Litoral;
Guayaquil, Ecuador
daviorte@espol.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-7678-5826>

Eduardo Almeida Benalcázar

Delft University of Technology;
Países Bajos; Delft
E.F.AlmeidaBenalcazar@tudelft.nl
<https://orcid.org/0000-0003-1786-3948>

Pedro Luis Castro Verdezoto

Universidad de Guayaquil; Guayaquil, Ecuador
luis.castroverd@ug.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3450-9855>



Resumen

En el contexto del Acuerdo de París y los compromisos de reducción de Gases Efecto Invernadero plasmados en las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC), se explora el potencial de la biomasa residual de la producción agrícola para su aprovechamiento en la generación eléctrica en los países amazónicos. Se plantea este estudio como una exploración inicial de la bioeconomía para facilitar la transición de una estructura productiva con base fósil hacia productos de valor agregado con base biológica. Se realiza un análisis de los procesos de generación y se estiman los inventarios lignocelulósicos para determinar el potencial de sustitución. Para el cálculo de la reducción de las emisiones se desarrolla un modelo simplificado de Ciclo de Vida. En consecuencia, Brasil y Argentina se identifican como los países con mayor potencial de sustitución debido a los altos volúmenes resultantes de la relación residuos/producción. Las cadenas productivas de soya y caña de azúcar son las de mayor potencial de aprovechamiento en el cono sur y la región andina, respectivamente. Conocimiento generado de esta exploración inicial puede contribuir a la toma de decisiones que permitan incrementar la ambición de las NDC desde la contribución climática del sector agrícola a partir de la circularidad de la bioeconomía.

Palabras clave: Bioeconomía; Generación Eléctrica; Ciclo de Vida; Reducción de GEI; NDC.

Abstract

In the context of the Paris Agreement and the commitments to reduce Greenhouse Gases embodied in the Nationally Determined Contributions (NDC), the regional potential of residual biomass from agricultural production for its use in electricity generation is explored. This study is proposed as an initial approximation to the potential of the bioeconomy to facilitate the transition from a fossil-based production structure to biologically-based value-added products. An analysis of the generation processes is carried out and lignocellulosic inventories are estimated to determine the substitution potential. To calculate the reduction of emissions, a simplified Life Cycle model is developed. Consequently, Brazil and Argentina are identified as the countries with the greatest substitution potential due to the high volumes resulting from the waste/production ratio. The soybean and sugarcane production chains have the greatest potential for promotion in the southern cone and the Andean region, respectively. Knowledge generated from this initial exploration can inform policy decision-making that allows increasing the ambition of the NDCs based on

the climate contribution of the agricultural sector and its circular bioeconomy potential.

Keywords: Bioeconomy; Power generation; Life cycle; GHG Reduction; NDC.

Introducción

El sexto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) evidencia la relación entre el cambio climático y las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (IPCC, 2021). Se acentúa la necesidad del pronto logro de la meta del Acuerdo de París sobre la reducción de los Gases Efecto Invernadero (GEI). Para el efecto, Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) se convierte en un importante instrumento para reflejar el compromiso de reducción de los países. Al respecto, estudios previos han resaltado el potencial de contribución climática de desarrollar un conjunto de actividades económicas relativas a la invención, desarrollo, producción y uso de productos y procesos basados en los recursos biológicos aprovechando la biodiversidad existente, en particular de países megabiodiversos como los de la cuenca amazónica (Ortega-Pacheco *et al.*, 2018).

La generación de electricidad es uno de los principales sectores de emisión de GEI en el mundo (IEA, 2021), de allí que diversos estudios evalúan alternativas tecnológicas o insumos no tradicionales mitigar su impacto en niveles de emisión por país (IEA, 2020; Kocak *et al.*, 2023). En este contexto, la biomasa se presenta como una alternativa viable en determinadas regiones producto de su biodiversidad o condiciones productivas (Hiloidhari & Baruah, 2011). Una característica común de estas regiones es la relación productiva vinculadas al sector agrícola y rural, donde los residuos de los cultivos agrícolas son desechados, o en el mejor de los casos su potencial energético no es aprovechado en su totalidad (Portugal-Pereira *et al.*, 2015).

Por ejemplo, Zinla *et al.* (2021) determinan las propiedades termoquímicas de estos residuos de cultivos para ser utilizado como combustible para una central térmica de biomasa para la producción de electricidad en zonas rurales de Costa de Marfil. Los resultados revelaron que los residuos de los cultivos de arroz, café y cacao tenían poderes caloríficos superiores que oscilaban entre 12,24 y 15,02 MJ/kg. Así mismo, Chauhan *et al.* (2022) estima el potencial bioenergético de 12 cultivos agrícolas cultivados en la India en función de los residuos y excedentes brutos de cultivos. Considerando que en India se producen mil millones de toneladas brutas anuales de residuos de

cultivos, la evaluación potencial para uso energético de ciertos excedentes disponibles se estima en 53.767 MW por año.

Una amplia revisión del estado del arte sobre la metodología ACV en el proceso de generación eléctrica fue desarrollada por Turconi *et al.* (2013) y Varun *et al.* (2009), el primer caso comparo todas las tecnologías existentes, mientras que en el segundo se limitó exclusivamente a fuentes renovables. En ambos casos se concluye que el uso de biomasa reduciría significativamente emisiones GEI en el sistema, pero resaltan la preponderancia de las emisiones en la infraestructura y operaciones. De allí que, empleando esta misma metodología, Chary *et al.* (2018) evalúan los impactos ambientales de la producción de energía eléctrica empleando caña de azúcar. Por su parte, Wang *et al.* (2020) evaluaron las implicaciones socio económicas y medioambientales en la producción de etanol.

Estudios previos evidencian el aprovechamiento de la biomasa. Entre ellos se destaca, Bacellar and Rocha (2010) para el aprovechamiento de la biomasa mediante la gasificación para satisfacer las necesidades de electricidad en sectores rivereños. Macedo *et al.* (2016) proponen el desarrollo de un sistema de generación eléctrica a partir de la biomasa para ampliar la cobertura en comunidades aisladas. Por su parte, Meza and Rincon (2016) desarrollaron un atlas del potencial energético de la biomasa residual mediante un sistema de información geográfica para zonas no interconectadas de la región amazónica. Cuervo and Guzmán (2020) cuantifican el potencial energético de la biomasa residual forestal y de cultivos energéticos en el Amazonas Colombo-Brasileño. De igual forma, Vargas-García *et al.* (2021) evaluaron el potencial de la biomasa en América del Sur para la producción de bioplásticos; y, Aguiar *et al.* (2022) analizaron los principales factores que influyen en el impacto, manejo y aprovechamiento de los residuos agroindustriales para mejorar la calidad medioambiental y desarrollar economía circular.

En la bioeconomía, los residuos lignocelulósicos (también llamados biomasa residual) generados a partir de las actividades agrícolas y agroindustriales representan materias primas útiles para la generación de bienes de mayor valor agregado (Ortega-Pacheco *et al.*, 2021), donde se presenta como oportunidad desplazar a materiales fósiles en las cadenas de generación eléctrica. En este contexto, el presente estudio evalúa el potencial de reducción de las emisiones de GEI que tendría esta actividad basado en un análisis simplificado del ciclo de vida – ACV (también conocida como life cycle assessment) para cuantificar las emisiones de GEI (Hauschild, 2017).

Materiales y métodos

El estudio considera como posibles nichos para el aprovechamiento de biomasa residual del sector agrícola y agroindustrial a i) los procesos de generación eléctrica basados en la combustión de materiales fósiles. La metodología describe el procedimiento seguido para cuantificar las emisiones de GEI de los dos sectores mencionados, en su situación más actual. La cuantificación de las emisiones de GEI se realiza mediante la medición del potencial de calentamiento global a 100 años (PCG, o GWP por su nombre en idioma inglés) obtenida a través de un análisis de ciclo de vida (ACV), de la cuna a la sepultura.

Teniendo presente la heterogeneidad de la estructura económico-productiva de la región, se adopta la estructura de bloques económicos como espacios de integración para aproximar el análisis: Comunidad Andina de Naciones (CAN) y Mercado Común del Sur (MERCOSUR). Este planteamiento se considera basando las características económicas-productivas de los países miembros, el análisis resultados será priorizando los países de la cuenca amazónica. La cuantificación del potencial que tendría el uso de la biomasa residual del sector agrícola para reemplazar a las materias primas fósiles en la generación eléctrica se realiza en dos etapas:

- Cuantificación de los flujos energéticos y flujos de residuos lignocelulósicos subproductos de la actividad agrícola.
- Estructura del análisis de ciclo de vida.

Se emplea datos oficiales por país o informes de organismos internacionales para mantener una estructura homogénea en el tratamiento de los datos y permitir una evaluación comparativa de los resultados. En la **Generación Eléctrica**, producto de la diversidad de fuentes, heterogeneidad en potenciales calóricos, eficiencia en procesos de transformación y demás condiciones técnicas, es deseable mantener un método homogéneo para el tratamiento de los datos. Esto permite evitar sesgos en la obtención de resultados y asegurar la comparabilidad entre los diferentes países observados. Por lo que, para la obtención de información en la generación eléctrica se emplean los Balances Nacionales de Energía para cada país empleando la base de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).

Figura 1.

Estructura estimación de inventario lignocelulósico.

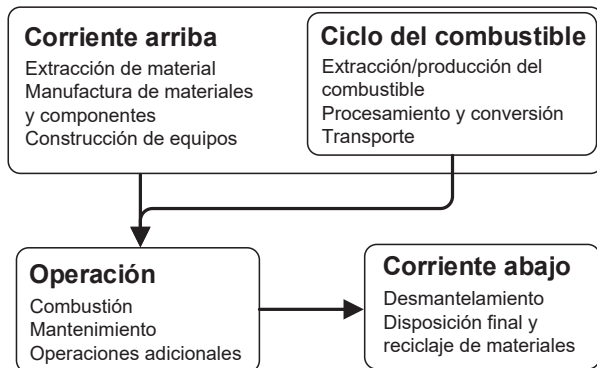


En la revisión literaria realizada no se encontraron Inventarios lignocelulósicos para la región o países estudiados. El presente estudio aproxima este inventario mediante una relación entre los niveles de producción agrícola y los residuos generados, considerando literatura o estudios previos que han estimado niveles de rendimiento, producción de residuos y potencial de aprovechamiento mediante evidencia empírica (Cervi *et al.*, 2019, 2020; Portugal-Pereira *et al.*, 2015). La producción agrícola es determinada en base a la cantidad de productos cuantificados en toneladas métricas (TM). La producción mundial de cultivos primarios se estima en 11.823 millones de TM (FAO, 2021), los países en estudio tendrían una participación del 12%, es decir 1.468 millones de TM. Los parámetros consideran la cantidad de residuos por tipo de cultivo, así como el potencial calórico de los mismos para la producción de energía mediante el aprovechamiento térmico de estos residuos (Figura 1).

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) incluye las etapas comprendidas desde la cuna hasta la sepultura. Es decir, para la generación de energía eléctrica, se incluyen las emisiones no solo de los combustibles fósiles sino también de la producción, uso y disposición final de la planta de generación de energía. La Figura 3 muestra en detalle las etapas consideradas. Los índices de emisiones de GEI estimados según este esquema de conteo se presentan en la Tabla 1.

Figura 2.

Etapas consideradas dentro del ACV en la producción de electricidad.



Nota. Adaptación de NREL (2021)

Para la conversión de las unidades de masa y volumen de la utilización de los combustibles fósiles (como se muestra en la Tabla 1) a unidades energéticas, se utilizaron varios supuestos basados en referencias de literatura. El poder calorífico inferior del carbón, el crudo (y sus derivados líquidos) y el gas natural son: 25,8 MJ/kg, 42,3 MJ/kg y 36,9 MJ/m³, respectivamente (EPA, 2019). Para la conversión energética en la planta generadora, se asumieron las siguientes eficiencias térmicas: 38%, 44% y 49 % para el carbón, el crudo y el gas natural, respectivamente (O'Donoghue *et al.*, 2014; Whitaker *et al.*, 2012). 1 Bbl es equivalente a 114,4 kg de crudo. Finalmente, las emisiones relacionadas a la utilización de la biomasa residual como materia prima para la producción de energía eléctrica se incluyen en la Tabla 1, por cada etapa indicada en la Figura 2.

Tabla 1.

Parámetros del inventario de ACV en la producción de electricidad.

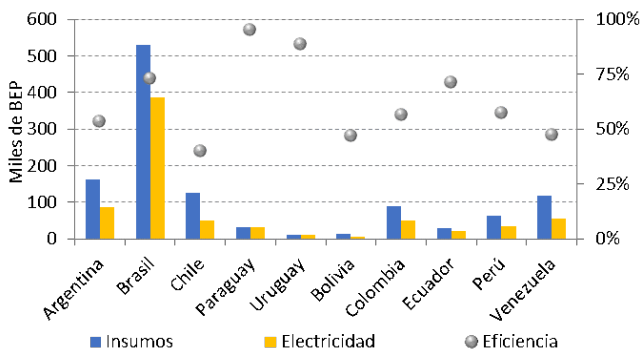
Combustible	GWP, g _{CO2e} /kWh			Eficiencia térmica (%)	Poder Calorífico Inferior MJ/(unidad)
	Mínimo	Mediana	Máximo		
Carbón	890	1001	1130	38	25,8 (/kg)
Crudo	720	840	910	44	42,3 (/kg)
Gas natural	435	486	564	49	36,9 (/m ³)
Biomasa	32	64	129	40	Ver Tabla 3

Nota. Adaptado de di Noi & Ciroth, 2017; EPA, 2007, 2019; NREL, 2021; O'Donnoghue *et al.*, 2014; Whitaker *et al.*, 2012

Previa a la implementación del modelo ACV es necesario un tratamiento de datos y análisis preliminar para determinar los principales comportamientos y estructurar de manera apropiada los inventarios de emisiones. Este procedimiento permite mantener resultados consistentes y acorde a las metodologías del IPCC. La eficiencia en la transformación de energía es considerada de interés debido a su vinculación a niveles de emisiones de GEI. Un mayor parque termoeléctrico implica menor eficiencia en el proceso de transformación y por ende un mayor consumo de fuentes fósiles (Castro Verdezoto *et al.*, 2019). Por su parte; un mayor parque hidroeléctrico implica mayor eficiencia en el proceso de transformación y un menor consumo de fuentes fósiles.

Figura 3.

Eficiencia en la generación de energía eléctrica por país.



Nota. Elaborado con datos OLADE (2023)

Como se aprecia en la Figura 3, Paraguay y Uruguay demuestran mayor eficiencia en la generación de energía eléctrica, con 95% y 89%, respectivamente. Este desempeño es producto de una mayor participación hídrica en su matriz de generación. No obstante, son países de menor capacidad instalada y generación eléctrica. Por otro lado, Bolivia, Chile y Venezuela son los casos con menor eficiencia, pero con mayores niveles producción eléctrica, reflejando una oportunidad de sustitución. Brasil, es el principal consumidor y generador de electricidad. Presenta una eficiencia en su proceso de transformación del 80%.

Resultados y discusión

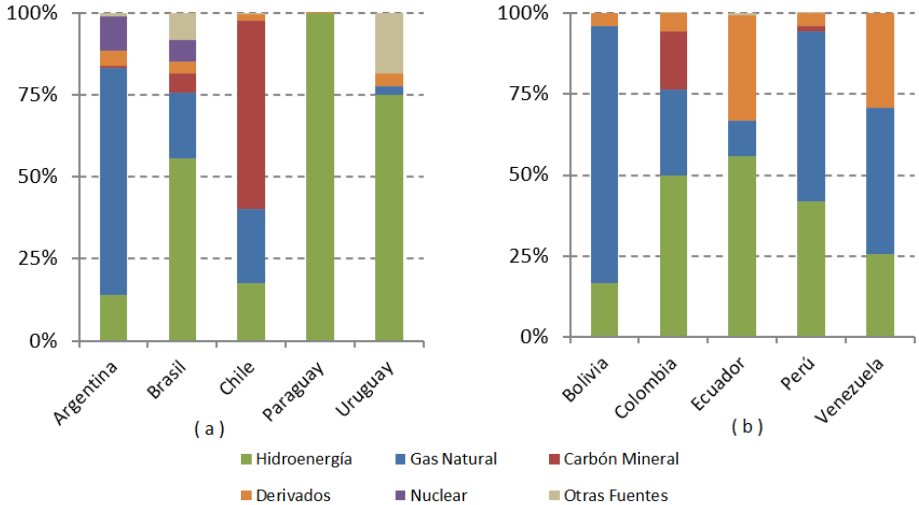
En los países en estudio tenemos un potencial incremento del 33% de eficiencia energética, donde el potencial bioeconómico podría contribuir a alcanzarlo a través de la sustitución de fuentes fósiles o la expansión de tecnologías más eficientes. Por su parte, los países de mayor aprovechamiento hidroeléctrico tendrían menor potencial de sustitución, por lo que los países con mix energético basado en generación termoeléctrica podrían aprovechar este potencial y reducción sus emisiones.

Generación Eléctrica

En la Figura 4 que la hidroelectricidad está presente en todos los países de estudio variando su grado de participación. Considerando la participación de fuentes fósiles, Chile sería el país con mayor potencial, producto de la participación del carbón mineral en la generación eléctrica (50%) y su asociado mayor impacto en GEI dentro de las fuentes fósiles (Park *et al.*, 2013). En principio un insumo carente en el mercado doméstico lo cual abre la oportunidad de sustitución de importaciones.

Figura 4.

Fuentes de energía en generación eléctrica por bloque (a) MERCOSUR y (b) CAN.



Nota. Elaborado con datos OLADE (2023)

Adicionalmente, el gas natural es priorizado en los procesos de generación, siendo este dentro de las fuentes no renovables la alternativa tecnológica de mejores rendimientos y menor emisiones de GEI (Ramírez *et al.*, 2019). Bolivia y Argentina son los casos de mayor participación de gas natural en su matriz de generación. El primero en calidad de productor-exportador de gas natural y, en el caso argentino, por la infraestructura existente en el sector residencial e industrial. Su naturaleza de productor-importador, permite en el caso argentino una oportunidad de sustitución de importaciones mediante el aprovechamiento de la circularidad de la bioeconomía.

En el caso ecuatoriano y venezolano, el consumo de combustibles de base fósil en la generación eléctrica presenta una oportunidad de sustitución con productos de base biológica. El precio relativo de estos insumos energéticos plantea un desafío de competitividad (Castro *et al.*, 2018). En este contexto, el posible aumento de ambición de las NDC de estos países definiría una oportunidad de transición considerando las significativas reducciones de GEI.

Tabla 2.

Consumo total de combustibles fósiles para la producción de electricidad.

Bloque	País	Consumo de combustibles		
		Crudo y derivados (Miles Bbls)	Gas natural Millones m ³	Carbón mineral (Miles Ton)
Cono sur	Argentina	5.369	17.347	190
	Brasil	13.431	14.343	7.539
	Chile	748	2.923	9.821
	Paraguay	4	0	0
	Uruguay	290	32	0
Comunidad Andina	Bolivia	489	1.604	0
	Colombia	4.704	3.644	3.067
	Ecuador	8.382	512	0
	Perú	2.201	4.395	192
	Venezuela	30.176	7.200	0
TOTAL		65.796	52.000	20.810

Nota. Elaborado con datos OLADE (2023)

En general, tomando todos los países del estudio, existe una participación mayoritaria de fuentes fósiles para la generación eléctrica (56%), situación semejante entre los bloques económicos. El potencial de aprovechamiento bioeconómico para la generación eléctrica es del 44%. Pese a la factibilidad técnica de sustitución, existen desafíos económicos y de mercado del carbón mineral, gas natural, derivados del petróleo que se recomienda explorar en posterior estudio. Por lo tanto, considerando los niveles actuales de eficiencia y la participación de fuentes fósiles en la generación eléctrica, estos hallazgos permiten evaluar el potencial de reducción de GEI considerando un escenario de aprovechamiento de recursos biológicos, en el que los compromisos nacionales de reducción de GEI, como los son las NDC, serían una oportunidad de apalancar la transición productiva y sustentable del sector eléctrico.

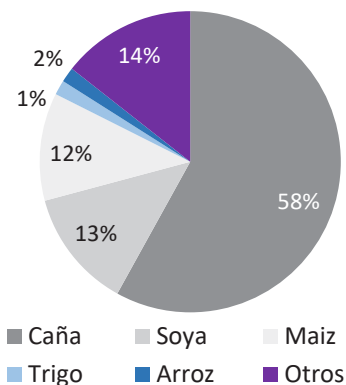
Inventario lignocelulósico

Dentro del total de la producción agrícola regional, es de resaltar el peso específico de la producción brasilera que concentra el 74%. La Nación Argentina es el segundo mayor productor con una participación del 12%, la cual es 6 veces inferior a la producción brasileña, pero equivalente a la producción de los demás países en conjunto. Así mismo, existe una contribución predominante de los países andinos, concentrando el 77% de la producción.

Los cultivos de caña de azúcar son predominantes para todos los casos, con excepción de Chile, el cual tiene una variedad de cultivos permanentes. Los cultivos de caña de azúcar, soya y trigo representan el 83% de la producción agrícola primaria. El 14% correspondiente a otros cultivos representa una producción de 209 millones de TM distribuidas entre 50 y 70 tipos de cultivo.

Figura 5.

Producción agrícola desagregada por tipo de cultivo.

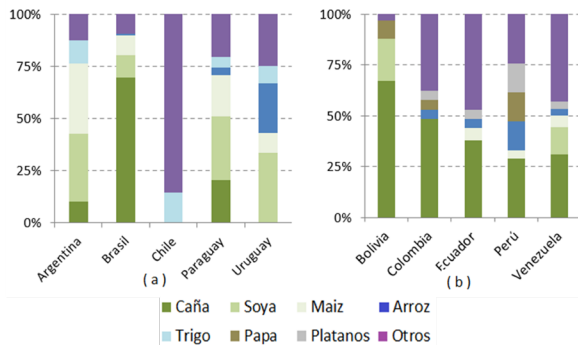


Nota. Elaborado con bases de datos (FAO, 2021)

Existen diferentes patrones de cultivo ente los bloques económicos, de allí que en el bloque de los países andinos presentan dos características de interés: 1) el cultivo de caña de azúcar tiene participaciones significativas para todos los casos, 2) existe una mayor diversificación de cultivos (Figura 6b), condición vinculada a sus condiciones geográficas y hábitos de consumo local. En los Países del Cono Sur, existe una menor diversificación de cultivos, concentrando su producción en caña de azúcar y soya. Esta condición se acentúa en Brasil donde la participación de caña de azúcar en la producción agrícola equivale al 70% de su producción anual (Figura 8a) para obtención de azúcar y etanol para consumo en el transporte vehicular (Moreira *et al.*, 2014).

Figura 6.

Producción agrícola desagregada por cultivos primarios (a) Cono Sur y (b) CAN.



Nota. Elaborado con bases de datos (FAO, 2021).

Tabla 3.

Rendimientos de la producción y poder calorífico por tipo de residuo.

Cultivo	Residuo	Razón residuo - producto, kg/kg	Poder Calorífico Inferior, MJ/kg
Caña de azúcar	Paja	0,22	18,6
	Bagazo	0,22	19,8
Soya	Paja	2,01	20,09
Maíz	Rastrojo	1,53	18,67
Trigo	Paja	1,55	19,54
Arroz	Paja	1,54	17,22
	Cascarilla	0,26	17,08

Nota. Tomado de Portugal-Pereira *et al.* (2015)

La Figura 6b muestra la participación significativa de los cultivos de papa en la producción agrícola de Bolivia, Perú y Colombia. Los cultivos de plátano tienen participaciones significativas en los países andinos, por las condiciones del litoral tropical. Los cultivos de arroz tienen participaciones considerables en los países con menos producción agrícola, resaltando que los desechos de este tipo de cultivos tienen alto valor energético para su aprovechamiento

lignocelulósico. En consecuencia, el inventario lignocelulósico considera las condiciones productivas y focaliza en la estimación de residuos producto del procesamiento de la caña de azúcar, soja y trigo para explorar el potencial de aprovechamiento. Las estimaciones lignocelulósicas de la caña de azúcar serán empleadas para evaluar el potencial en el bloque de los países andinos.

En los países de mediana producción agrícola y alta diversificación de cultivos, se prioriza el potencial de los cultivos permanentes, ya que los mismos permiten un flujo continuo de biomasa, a diferencia de los cultivos temporales o transitorios donde existiría una alta incertidumbre. Se descartarán los cultivos cuyos residuos contienen bajo poder calórico, sean por exceso de humedad o bajo contenido lignocelulósico. Su aprovechamiento en principio sería menos eficiente en conversión implicando altos consumo de energía o el uso de tecnología inmaduras asociada a altos costos de producción.

La estimación de la cantidad de residuos generados de la producción del producto agrícola primario (alimento) se realiza mediante los índices de rendimiento mostrados en la Tabla 3. Se toma en cuenta la disponibilidad de estos residuos en campo asumida en 60 % considerando que una parte de la biomasa residual (el 40%) se reincorpora al suelo por procesos aeróbicos de descomposición. Solo para el caso de la paja de la caña de azúcar la disponibilidad es de 39 %, considerando que el 35% de los cultivos de caña son quemados antes de la cosecha.

Reducción de GEI

Los resultados obtenidos para la cuantificación de los flujos energéticos de materiales, seguido por los resultados de la cuantificación de las emisiones de GEI relacionados a dichos flujos. Para la validación de los resultados obtenidos los resultados de las emisiones de GEI son comparados con datos reportados en fuentes oficiales. La Tabla 4 muestra los flujos estimados de la producción de energía eléctrica basada en la combustión de materiales fósiles, por lo que existe una comparación con flujos totales obtenidos de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).

Tabla 4.

Flujos de producción de energía eléctrica basada en combustibles fósiles.

País	Flujo de energía eléctrica, kWh/año (x10 ⁹)				Total estimado	Reportado por OLADE
	Combustible fósil			Petróleo y derivados líquidos		
	Carbón	Gas natural				
Argentina	2.7	0.6	87.0	90.4	80.0	
Brasil	7.9	23.5	72.0	103.3	94.0	
Chile	0.4	30.6	14.7	45.7	43.2	
Paraguay	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	
Uruguay	0.2	0.0	0.2	0.3	0.3	
Bolivia	0.3	0.0	8.0	8.3	6.6	
Colombia	2.8	9.6	18.3	30.6	14.7	
Ecuador	4.9	0.0	2.6	7.5	7.0	
Perú	1.3	0.6	22.1	23.9	22.5	
Venezuela	17.6	0.0	36.1	53.8	50.4	

En concordancia con los resultados previos, Brasil y Argentina presentan las mayores concentraciones de los países en estudio. Mientras que Uruguay y Paraguay evidencia producciones termoeléctricas más bajas. En el primer caso se presentan importaciones significativas de energía para satisfacer su demanda interna, mientras que en el caso paraguayo se explicaría debido a que la totalidad la producción proviene de fuentes hídricas.

Figura 7.

Potencial reducción de emisiones de GEI.

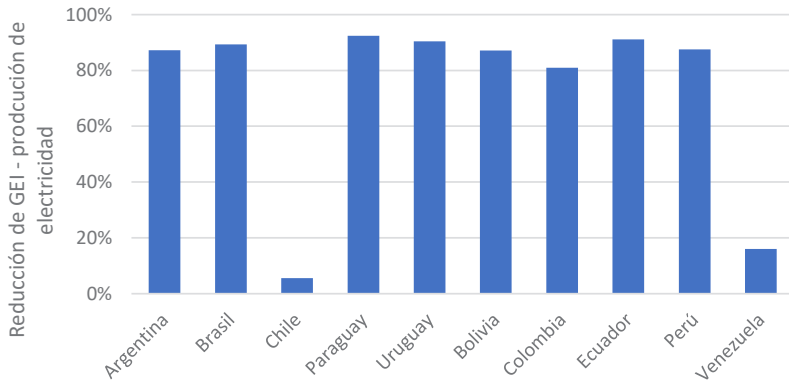


Tabla 5.

Potenciales flujos de producción de energía eléctrica basada en la biomasa residual.

País	GWh/año (x10 ³)								Total
	Cultivo	Caña de azúcar		Soya	Maíz	Trigo	Arroz		
	Residuo	Paja	Bagazo	Paja	Rastrojo	Paja	Paja	Cascarilla	
Argentina		3.1	5.1	147.3	107.2	38.9	0.0	0.0	301.6
Brasil		132.2	216.5	304.5	190.7	0.0	18.1	3.0	865.0
Chile		0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	2.8
Paraguay		1.0	1.7	22.7	10.5	2.7	1.9	0.3	40.8
Uruguay		0.0	0.0	7.5	1.5	1.5	3.5	0.6	14.6
Bolivia		1.7	2.7	8.0	0.0	0.0	2.2	0.4	15.0
Colombia		5.7	9.4	0.0	0.0	6.0	5.5	0.9	27.5
Ecuador		1.6	2.7	0.0	2.8	2.2	0.0	0.0	9.3
Perú		1.9	3.1	0.0	3.0	10.6	9.3	1.6	29.6
Venezuela		0.8	1.3	5.2	1.4	1.0	0.0	0.0	9.7

Para todos los países considerados, con excepción de Chile, Colombia y Venezuela la utilización de los flujos actuales de biomasa residual como insumo para la generación de energía eléctrica podría ser suficiente para reemplazar un 100 % de los combustibles fósiles. En términos de emisiones de

GEI evitadas, el efecto de este reemplazo sería importante. Estos resultados evidencian el potencial de reducción de GEI en la región producto del aprovechamiento de la biomasa residual que permitiría elevar el cumplimiento de los objetivos de las NDCs así como explorar su incremento de ambición de existir la disponibilidad de recursos requeridos.

En la mayoría de los países se puede lograr una sustitución del 100% de los combustibles fósiles puede ser reemplazado por la biomasa residual (Figura 7), la reducción de emisiones de GEI alcanza alrededor del 90 %. Para Chile, Colombia y Venezuela, la reducción sería del 6, 81 y 16 %, respectivamente. Cabe notar que en el caso colombiano la reducción de GEI podría ser mayor si se usan los datos de producción energética de la OLADE.

Cabe recalcar que actualmente, los equipos de generación eléctrica que son capaces de utilizar la biomasa residual como combustible, utilizan al menos un 50% de carbón mineral pulverizado junto con un 50% de biomasa residual (Livingston *et al*, 2016). Esto hace que, teniendo en cuenta la tecnología actual, el potencial para la reducción de las emisiones de GEI mostrado en la Tabla 5, sea un 50% menor, por lo menos. Por otra parte, la adecuación de los sistemas actualmente instalados en la región de generación eléctrica para que acepten el uso de biomasa como combustible puede conllevar altas inversiones de capital; el costo del transporte de la biomasa desde los campos hasta las plantas de generación eléctrica es otro reto a superar.

Finalmente, dentro de las posibilidades para aprovechar la energía química contenida en la biomasa residual, está su transformación en combustibles y sustancias químicas, por medio de gasificación, licuefacción o fermentación. Tales tecnologías aprovechan el carbono contenido en la biomasa, reemplazando al carbono fósil. La energía eléctrica para tales procesos puede venir de fuentes renovables como plantas hidroeléctricas, turbinas eólicas, celdas fotovoltaicas, entre otras (Livingston, 2016).

Conclusiones

El uso de la biomasa residual en los países de estudio se presenta como una alternativa menos contaminante para la generación eléctrica con importante contribución a la reducción de niveles de GEI aportando al logro de objetivos actuales en las NDC. En términos absolutos, Brasil y Argentina son los países con mayor potencial de sustitución producto de la extensión geográfica, tamaño de mercado y volumen de producción. En términos relativos, Paraguay y Perú serían los principales beneficiados de esta transición pro-

blemente por el uso más intensivo del recurso hídrico y gas natural en la generación eléctrica.

En los países del cono sur los residuos de la producción de soya tienen la mayor relevancia en la generación eléctrica debido a dos factores: una ratio elevada de residuos/producción, un elevado poder calorífico. Se recomienda realizar estudios focalizados en esta categoría para evaluar la factibilidad técnica y económica de su aprovechamiento.

En los países andinos los residuos de la producción de caña de azúcar tienen la mayor relevancia en la generación eléctrica, a pesar de tener una razón de residuos/producción baja, sus altos volúmenes de producción compensan esta condición. Considerando que en esta región actualmente existen aprovechamientos energéticos como la cogeneración, es recomendable explorar alternativas con tecnologías más eficientes en conversión que generen mayor valor agregado.

Conflictos de intereses

Los autores del presente artículo científico manifestamos que no tenemos conflictos de intereses en la elaboración y presentación del mismo a la comunidad científica.

Agradecimientos

Este estudio se completó gracias a la valiosa retroalimentación y financiamiento del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

Referencias

- Aguiar, S., Enríquez Estrella, M., & Uvidia Cabadiana, H. (2022). Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento. *Axioma*, *1*(27), 5–11. <https://doi.org/10.26621/ra.v1i27.803>
- Bacellar, A. A., & Rocha, B. R. P. (2010). Wood-fuel biomass from the Madeira River: A sustainable option for electricity production in the Amazon region. *Energy Policy*, *38*(9), 5004–5012. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.04.023>
- Castro, P., Castro, M., & Cunha, M. (2018). Análisis Comparativo de Indicadores Energéticos de Países Miembros de la Comunidad Andina de Naciones. *Revista Técnica "Energía"*, *14*, 236–245. <https://doi.org/ISSN1390-5074>

- Castro Verdezoto, P., Vidoza, J., & Gallo, W. (2019). Analysis and projection of energy consumption in Ecuador: Energy efficiency policies in the transportation sector. *Energy Policy*, *134*(August). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110948>
- Cervi, W. R., Lamparelli, R. A. C., Seabra, J. E. A., Junginger, M., de Jong, S., & van der Hilst, F. (2020). Spatial modeling of techno-economic potential of biojet fuel production in Brazil. *GCB Bioenergy*, *12*(2), 136–157. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12659>
- Cervi, W. R., Lamparelli, R. A. C., Seabra, J. E. A., Junginger, M., & van der Hilst, F. (2019). Bioelectricity potential from ecologically available sugarcane straw in Brazil: A spatially explicit assessment. *Biomass and Bioenergy*, *122*(March 2018), 391–399. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.001>
- Chary, K., Aubin, J., Guindé, L., Sierra, J., & Blazy, J. M. (2018). Cultivating biomass locally or importing it? LCA of biomass provision scenarios for cleaner electricity production in a small tropical island. *Biomass and Bioenergy*, *110*(January 2017), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.01.009>
- Chauhan, A., Upadhyay, S., Saini, G., & Senthilkumar, N. (2022). Agricultural Crop Residue Based Biomass in India: Potential Assessment, Methodology and Key Issues. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *53*(PB), 102552. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102552>
- Cuervo, J., & Guzmán, J. (2020). *Determinación del potencial energético de la biomasa residual forestal en el amazonas* [Universidad Francisco José de Caldas]. <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
- Di Noi, C., & Ciroth, A. (GreenDelta). (2017). Calculation of energy indicators in MJ, LHVs: An addition to the CED LCIA method. *GreenDelta*, *2017*(October), 25. <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2017/10/Calculation-of-energy-indicators-in-MJ-LHVs.pdf>
- EPA. (2007). Methodology for Thermal Efficiency and Energy Input Calculations and Analysis of Biomass Cogeneration Unit Characteristics. In *U.S. Environmental Protection Agency* (Vol. 1, Issue 5).
- EPA. (2019). Colombia Coal Mine Methane Market Study. *US Environmental Protection Agency, March*.

- FAO. (2021). *FAOstat Data Base*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Hauschild, M. Z. (2017). Introduction to LCA methodology. In *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_6
- Hiloidhari, M., & Baruah, D. C. (2011). Crop residue biomass for decentralized electrical power generation in rural areas (part 1): Investigation of spatial availability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(4), 1885–1892. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.010>
- IEA. (2020). Energy Technology Perspectives 2020. *International Energy Agency*. <https://doi.org/10.1787/ab43a9a5-en>
- IEA. (2021). *International Energy Outlook 2021*. https://www.eia.gov/press-room/presentations/AEO2021_Release_Presentation.pdf
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In *Summary for Policymakers*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Kocak, E., Ulug, E. E., & Oralhan, B. (2023). The impact of electricity from renewable and non-renewable sources on energy poverty and greenhouse gas emissions (GHGs): Empirical evidence and policy implications. *Energy*, *272*(February), 127125. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127125>
- Livingston, W. R. (2016). The status of large scale biomass firing: The milling and combustion of biomass materials in large pulverised coal boilers. In *IEA Bioenergy Task 32: Biomass Combustion and co-firing*.
- Macedo, W. N., Monteiro, L. G., Corgozinho, I. M., Macêdo, E. N., Rendeiro, G., Braga, W., & Bacha, L. (2016). Biomass based microturbine system for electricity generation for isolated communities in amazon region. *Renewable Energy*, *91*, 323–333. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.063>
- Meza, G., & Rincon, C. (2016). *Atlas de potencial energético de biomasa residual mediante sistemas de información geográfica* [Universidad Francisco José de Caldas]. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/27987/Rincon.Cristian&Meza.Andres.2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Moreira, J. R., Pacca, S. a., & Parente, V. (2014). The future of oil and bioethanol in Brazil. *Energy Policy*, *65*, 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.09.055>
- NREL. (2021). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation. In *National Renewable Energy Laboratory*.
- O'Donoghue, P. R., Heath, G. A., Dolan, S. L., & Vorum, M. (2014). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Electricity Generated from Conventionally Produced Natural Gas: Systematic Review and Harmonization. *Journal of Industrial Ecology*, *18*(1), 125–144. <https://doi.org/10.1111/jiec.12084>
- OLADE. (2023). *Energy Information System of Latin America and the Caribbean - sieLAC*. Latinamerican Energy Organization. <http://sier.olade.org/>
- Ortega-Pacheco, D. V, Silva, A., López, A., Espinel, R., Inclán, D., & Mendoza-Jiménez, M. J. (2018). *Tropicalizing Sustainable Bioeconomy: Initial Lessons from Ecuador* (pp. 187–203). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73028-8_11
- Ortega-Pacheco, D. V., Castro-Verdezoto, P. L., Mendoza-Jiménez, M. J., Almeida Benalcázar, E., & Castro, M.-P. (2021). Social and Economic Contribution of the Bioeconomic Sector in Ecuador. In R. Venkatramanan, V. Shah, S. Prasad (Ed.), *Sustainable Bioeconomy* (pp. 35–65). https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-15-7321-7_3
- Park, N. B., Yun, S. J., & Jeon, E. C. (2013). An analysis of long-term scenarios for the transition to renewable energy in the Korean electricity sector. *Energy Policy*, *52*, 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.021>
- Portugal-Pereira, J., Soria, R., Rathmann, R., Schaeffer, R., & Szklo, A. (2015). Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Techno-economic and environmental assessment in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, *81*(April), 521–533. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.08.010>
- Ramirez, A. D., Rivela, B., Boero, A., & Melendres, A. M. (2019). Lights and shadows of the environmental impacts of fossil-based electricity generation technologies: A contribution based on the Ecuadorian experience. *Energy Policy*, *125*(November 2018), 467–477. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.005>

- Turconi, R., Boldrin, A., & Astrup, T. (2013). Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *28*, 555–565. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.013>
- Vargas-García, Y., Pazmiño-Sánchez, J., & Dávila-Rincón, J. (2021). Biomass potential in south America for the production of bioplastics. A review. *Revista Politecnica*, *48*(2), 7–20. <https://doi.org/10.33333/rp.vol48n2.01>
- Varun, Bhat, I. K., & Prakash, R. (2009). LCA of renewable energy for electricity generation systems-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(5), 1067–1073. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.004>
- Wang, C., Malik, A., Wang, Y., Chang, Y., Lenzen, M., Zhou, D., Pang, M., & Huang, Q. (2020). The social, economic, and environmental implications of biomass ethanol production in China: A multi-regional input-output-based hybrid LCA model. *Journal of Cleaner Production*, *249*, 119326. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119326>
- Whitaker, M., Heath, G. A., O'Donoghue, P., & Vorum, M. (2012). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Coal-Fired Electricity Generation: Systematic Review and Harmonization. *Journal of Industrial Ecology*, *16*(SUP-PL.1). <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00465.x>
- Zinla, D., Gbaha, P., Koffi, P. M. E., & Koua, B. K. (2021). Characterization of rice, coffee and cocoa crops residues as fuel of thermal power plant in Côte d'Ivoire. *Fuel*, *283*(July 2020). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119250>