

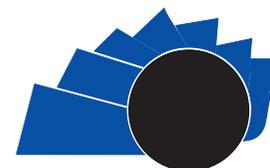


UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

## Visión Electrónica

### Más que un estado sólido

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele>



Visión Electrónica

VISIÓN ACTUAL

## Metodología para el aprovechamiento energético de desechos pecuarios–APRENDYSAGE

### Methodology for the energetic utilization of livestock waste–APRENDYSAGE

Alexis F. Ladino T.<sup>1</sup>, Jeimy A. Martínez R.<sup>2</sup>, Clara I. Buriticá A.<sup>3</sup>

#### INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

##### Historia del artículo:

Enviado: 27/09/2018

Recibido: 15/10/2018

Aceptado: 06/11/2018

##### Palabras clave:

Autogeneración

Biomasa

Potencial energético

Residuo pecuario

#### Open access



##### Keywords:

Self-generation

Biomass

Energy potential

Livestock waste

#### RESUMEN

En este documento se plantea la metodología denominada “APRENDYSAGE”, para el aprovechamiento de los recursos de biomasa residual pecuaria y su aplicación a partir de sistemas de autogeneración eléctrica. Por tanto, se realiza un análisis de investigaciones previas a nivel nacional e internacional para definir e identificar el potencial energético teórico y técnico asociado a este recurso, proporcionar la información que permita establecer una ruta y tecnología de conversión con el fin de generar electricidad a partir de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), superando las limitaciones de otras técnicas y métodos propuestos y estableciendo un modelo que tenga en cuenta las características geográficas, culturales y normativas de Colombia. Se evidencia que el principal atributo de la metodología APRENDYSAGE es su facilidad de aplicación a diferentes escalas en regiones de la geografía colombiana donde se disponga del recurso de biomasa residual pecuaria.

#### ABSTRACT

The objective of this document is to define a methodology called “APRENDYSAGE”, which consists of the use of waste from livestock biomass (animal waste) and its application from self-generating systems. For this purpose, an analysis of previous research studies at national and international level is carried out, in order to define and identify the theoretical and technical energy potential, associated with this resource, and to provide the tools to establish a route and conversion technology, in order to Generate electricity from non-conventional sources of renewable energy (FNCER), overcoming the limitations and problems of other techniques and methods proposed, and establishing a model that takes into account the geographical, cultural and normative characteristics of Colombia. It is evident that the main attribute of the APRENDYSAGE methodology is its ease of application at different scales in regions of the Colombian geography, where the livestock residual biomass resource is available.

<sup>1</sup> Ingeniero eléctrico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Actualmente vinculado a Quanta Services, Colombia. Correo electrónico: [fladinot@correo.udistrital.edu.co](mailto:fladinot@correo.udistrital.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4031-6766>

<sup>2</sup> Ingeniera eléctrica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Correo electrónico: [jeiamartinezr@correo.udistrital.edu.co](mailto:jeiamartinezr@correo.udistrital.edu.co). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0094-6819>

<sup>3</sup> Ingeniera electricista, PhD. en gestión eficiente de la energía eléctrica, docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Correo electrónico: [ciburiticaa@udistrital.edu.co](mailto:ciburiticaa@udistrital.edu.co). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4073-3471>

## 1. Introducción

El consumo energético es una de las características que define el bienestar y la prosperidad de una población. A 2015, la generación global de electricidad se da principalmente a partir de fuentes no renovables de energía, en particular de combustibles fósiles (76,5%), cuyos impactos ambientales y agotamiento de sus fuentes de energía, han originado la necesidad de implementar nuevas tecnologías a partir del aprovechamiento de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), con el objetivo principal de propender por un desarrollo energético sostenible, minimizando los impactos ambientales y promoviendo el uso eficiente de la energía [1].

El Estado colombiano en su preocupación por el agotamiento de los recursos energéticos y por la amenaza que esto representa para su sistema eléctrico, el cual es dependiente en más del 67,1% del recurso hídrico y 27% de los recursos fósiles [2], formuló mecanismos legales como la Ley 1715 de 2014 que busca promover la integración de las FNCER al sistema Energético Nacional con el objetivo de contribuir a la preservación del medio ambiente, aportar al abastecimiento energético y garantizar una mayor confiabilidad del servicio a partir del uso de recursos como el sol, el viento, la energía mareomotriz y residuos forestales, agrícolas, pecuarios y sólidos urbanos entre otros, los cuales pueden ser aprovechados para la generación de energía eléctrica [3]. De acuerdo con lo anterior, este documento tiene como objetivo definir una metodología para el aprovechamiento energético de la biomasa residual pecuaria con el fin de generar un modelo que permita la implementación e interconexión al sistema eléctrico convencional de unidades de autogeneración a partir de este recurso. Para ello se realiza una recopilación de material bibliográfico a nivel nacional e internacional, con el fin de analizar estudios previos y cada una de las metodologías existentes e identificar sus limitaciones para luego construir una metodología propia denominada “Metodología APRENDYSAGE”, que propone la formulación matemática para la estimación de los potenciales energéticos teórico y técnico de los desechos pecuarios; así como las condiciones y serie de pasos para su aprovechamiento, tanto en granjas a gran escala como a mediana y pequeña escala, que son las más representativas en Colombia.

## 2. Estudios previos para estimación del potencial energético de la biomasa residual pecuaria

En los últimos años diferentes entidades académicas y estatales, de gran reconocimiento a nivel mundial, han desarrollado investigaciones con el fin de determinar el potencial energético de fuentes renovables en cada país y establecer una metodología que permita utilizarlos en la generación de electricidad y calor, con el fin de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y por tanto la emisión de gases de efecto invernadero. A continuación, se presenta un breve resumen de algunos estudios realizados a nivel nacional e internacional referentes a la estimación del potencial energético enfocado principalmente a la biomasa residual pecuaria.

### 2.1. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia

Este documento recopila la información referente a la biomasa residual en Colombia e incluye la identificación, caracterización y evaluación del potencial energético de los residuos orgánicos provenientes de cultivos, actividades pecuarias y residuos sólidos urbanos [4].

Para determinar el potencial energético de los recursos de biomasa define una serie de pasos que inician con la recolección de las muestras, la caracterización de los residuos y finaliza con la determinación del potencial energético asociado al recurso.

#### 2.1.1. Método para la recolección de muestras

El método de recolección de muestras para la caracterización del residuo, consiste en trazar, en la zona a ser muestreada una línea imaginaria en forma de zig-zag, recolectando la muestra cada 15 o 30 pasos, posteriormente se realiza el protocolo de muestreo (muestreo por cuarteo) que consiste en mezclar el material (muestra) y apilarlo en forma de cono, para luego comprimirlo y dividirlo en 4 partes, de las cuales se eligen 2/4 opuestos de la muestra, se vuelve a mezclar y se repite el proceso tantas veces como sea necesario, por último, se coloca dentro de una bolsa plástica con sello hermético (ziploc) debidamente identificada y se introduce en una cava de hielo seco a una temperatura de 4 °C, de forma

que pueda ser trasladada al laboratorio para su posterior análisis [5].

### 2.1.2. Caracterización de la biomasa residual pecuaria

La caracterización de la biomasa residual pecuaria consiste en el análisis de los parámetros que componen la materia orgánica, a través del estudio de las características físicas y químicas del material (análisis fisicoquímico), el contenido energético, que hace referencia a la cantidad de energía que proviene del recurso y por último, el análisis microbiológico el cual define las características fisiológicas y metabólicas de los microorganismos (enterobacterias, hongos y levaduras) que habitan en las excretas pecuarias.

Los resultados del análisis permiten implementar un modelo matemático con el fin de determinar el potencial energético asociado al recurso.

### 2.1.3. Modelo matemático para la estimación del potencial energético

De acuerdo a la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), el aprovechamiento de la energía contenida en el estiércol está orientada a dos modelos: el primero consiste en la digestión anaerobia, que se aplica a los casos en que el porcentaje de humedad supera el 60% (bovinos, porcinos y aves de corral), y el segundo es el modelo termoquímico que se aplica cuando el contenido de humedad es inferior al 60% (aves de engorde), [4].

El potencial energético recuperable del estiércol animal (bovino, porcino y aves de corral) se estima de acuerdo a la ecuación (1), mientras que la ecuación (2) permite determinar el potencial energético de la biomasa residual proveniente de las aves de engorde, [4].

$$PE_{BPR} = \sum_{i=1}^n N_{Ai} * MS_i * SV * B_{oi} * PCI_{CH_4} \quad (1)$$

Donde:

$PE_{BPR}$ : Potencial energético de la biomasa residual [TJ/año]

$N_{Ai}$ : Número de animales [cabezas]

$MS$ : Materia Seca [kg MS/cabeza-año]

$SV$ : Sólidos Volátiles [kg SV/kg MS]

$B_o$ : Rendimiento del Biogás [m<sup>3</sup>/kg SV]

$PCI_{CH_4}$ : Poder Calorífico Inferior del metano [MJ/m<sup>3</sup>]

$i$ : hace referencia al grupo etario de cada subsector.

$$PE_{BRAE} = NA_e * MS * PCI_{CH_4} \quad (2)$$

Donde:

$PE_{BRAE}$ : Potencial energético de biomasa residual en aves de engorde [TJ]

$NA_e$ : Numero de aves de engorde [cabezas]

$PCI$ : Materia seca [kg/cabezas año]

### 2.2. Propuesta metodológica para la toma de decisiones sobre bioenergía en un contexto complejo y diverso (Salta – Argentina)

Esta metodología permite determinar las posibles fuentes de biomasa para ser aprovechadas con fines energéticos, considerando aspectos como el uso y la asignación de cada recurso y la implementación de herramientas para su evaluación dentro del contexto del cambio climático. Por otra parte, fomenta el uso de la biomasa dentro de un contexto no solo energético sino social donde exista un mayor acceso a la energía, mejor calidad de vida y la preservación del patrimonio cultural y natural de las regiones.

La metodología consiste específicamente en la formulación de 16 criterios, divididos en dos etapas que evalúan el tipo de recurso y establecen el proceso de conversión más eficiente, los recursos de biomasa seleccionados se someten a un análisis cuantitativo y cualitativo relacionado con cada criterio y se les asigna un puntaje a través de la estimación de los índices de disponibilidad (IDI) y adecuación (IDA) que permiten obtener un resultado final [5].

Para calcular el índice de disponibilidad, se desarrolla un análisis cualitativo de los criterios (existencia, equilibrio, esparcimiento, efectos, experiencias, exigencias, estimación, expectativa) clasificándolos en las escalas de alto, medio y bajo de acuerdo a los parámetros definidos en el documento de [6] para posteriormente, asignarle a cada una de las categorías un valor numérico de 0, 5 o 10 respectivamente.

De esta manera, el puntaje máximo que podría obtener el recurso al final de la evaluación sería de 80 puntos. La ecuación (3) muestra el cálculo del índice de disponibilidad.

$$IDI(\%) = \sum \frac{c_1 + c_2 + c_3 + c_4 \dots + c_8}{80} * 100 \quad (3)$$

Donde:

$c_1 + c_2 + c_3 + \dots + c_8$ : criterios de evaluación del recurso [6].

Una vez determinado el IDI, se realiza una categorización en función de los resultados de la siguiente manera:

- Óptimo: recurso con IDI entre 81 a 100 %
- Estable: recurso con IDI entre 61 a 80 %
- Inestable: recurso con IDI entre 41 a 60 %
- Crítico: recurso con IDI entre 21 a 40 %
- Colapso: recurso con IDI entre 0 a 20 %

Por otra parte, para calcular el índice de adecuación se sigue mismo procedimiento teniendo en cuenta para este caso los criterios que corresponden a la selección del proceso de conversión (Especificidad, empleo, escala, estado, ejecución, experiencia, emisiones, eficiencia) [6]. La ecuación (4) muestra el cálculo para el índice de adecuación.

$$IDA(\%) = \sum \frac{c_1 + c_2 + c_3 + c_4 \dots + c_8}{80} * 100 \quad (4)$$

La categorización según los resultados del IDA se determina de la siguiente forma:

- Óptimo: proceso con IDA entre 81 a 100 %
- Adecuado: proceso con IDA entre 61 a 80 %
- Medianamente adecuado: proceso con IDA entre 41 a 60 %
- Poco adecuado: proceso con IDA entre 21 a 40 %
- Inadecuado: proceso con IDA entre 0 a 20 %

### 2.3. Metodología formulada por la National Renewable Energy Laboratory (NREL) – Estados Unidos

El Laboratorio Nacional de Energías Renovables determina el potencial energético de los recursos clasificándolos en cuatro categorías denominados:

potencial del recurso, potencial técnico, potencial económico y potencial de mercado [7].

#### 2.3.1. Potencial del recurso o teórico

El potencial del recurso, se define como la cantidad de energía disponible físicamente. Para la estimación de los recursos de biomasa disponible en Estados Unidos, NREL realiza el análisis de datos de forma gráfica y estadística utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Estas estimaciones se fundamentan en diversos supuestos, metodologías adoptadas por otros estudios y factores que relacionan la población con la cantidad de residuos después de su consumo. Los recursos de biomasa disponibles para el aprovechamiento energético se clasifican en agrícolas, madereros, municipales y energéticos [8].

En cuanto a la estimación del potencial teórico de los residuos pecuarios, NREL determina las emisiones de metano del estiércol animal teniendo en cuenta los sistemas de manejo del estiércol incluidos en el Libro de trabajo de Estado: Metodologías de los gases de efecto invernadero desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. E.P.A.).

Para estimar las emisiones de metano de estiércol animal se debe:

1. Obtener los datos correspondientes a la población animal y las prácticas de manejo del estiércol
2. Calcular la cantidad de sólidos volátiles (VS) producidos por cada tipo de animal. Véase ecuación (5).
3. Determinar las emisiones de metano de cada sistema de manejo del estiércol y tipo de animal. Véase ecuación (6).
4. Convertir las emisiones a toneladas de metano. Véase ecuación (7).
5. Sumar las estimaciones para obtener el total anual de emisiones de metano. Véase ecuación (8) [9].

$$VS_i = N_i * TAM_i * \overline{VS}_i \quad (5)$$

$$CH_4 = VS_i * B_i * MCF_j * WS\%_{ij} \quad (6)$$

$$CH_{4(tons)} = CH_4 * \frac{0,0413}{2205} \quad (7)$$

$$Total\ CH4_{(tons)} = \sum_i \sum_j CH4_{(tons)} \quad (8)$$

Donde:

$VS_i$ : Sólidos volátiles totales producidos (lbs/yr) por tipo de animal  $i$

$N_i$ : Número de animales del tipo  $i$  (head)

$TAM_i$ : Masa típica del animal por tipo de animal  $i$  (lbs/head)

$\overline{VS}_i$ : Promedio anual de producción de sólidos volátiles por unidad de masa del tipo de animal  $i$  (VS por libra de masa del animal)

$CH_4$ : Emisiones de metano por tipo de animal  $i$  en el sistema  $j$  (ft<sup>3</sup>/yr)

$B_i$ : Máxima capacidad de producción de metano por libra de VS por tipo de animal  $i$

$MCF_j$ : Factor de conversión del metano por cada sistema de manejo  $j$

$WS\%_{ij}$ : Porcentaje de estiércol del tipo de animal  $i$  manejado en el sistema  $j$  de estiércol

$CH_{4(tons)}$ : Emisiones de metano en toneladas (tons/yr)

0,0413: Densidad del metano (lbs/ft<sup>3</sup>), factor de conversión a libras

2205: Libras a toneladas métricas

$Total\ CH4_{(tons)}$ : Emisiones de metano total anuales

### 2.3.2. Potencial técnico

El potencial técnico representa la generación de energía alcanzable de una tecnología particular teniendo en cuenta la disponibilidad y la calidad de los recursos, el rendimiento del sistema, las limitaciones topográficas, limitaciones ambientales y las restricciones de uso del terreno. Por lo anterior, se considera que este potencial tiene en cuenta tanto las limitaciones geográficas como el rendimiento del sistema [7].

Para determinar el potencial técnico de la biomasa, NREL en el estudio de López y Otros [7] clasifica los recursos en biomasa sólida y gaseosa considerando parámetros específicos de acuerdo al

tipo de biomasa como el Poder Calorífico Superior (PCS) y el factor de conversión que representa un sistema de producción de biomasa promedio con una eficiencia de conversión industrial establecida [5].

### 2.3.3. Potencial económico

Es el subconjunto del potencial técnico que está disponible donde el costo requerido para generar electricidad (el cual determina los ingresos mínimos requeridos para el desarrollo del recurso) está por debajo de los ingresos disponibles en términos de la energía y la capacidad desplazada. Esta medida puede ser un factor útil para entender la viabilidad económica de las tecnologías de generación renovable en un lugar específico o dentro de un área definida, así como para evaluar el impacto de las mejoras tecnológicas, políticas y otras acciones que puedan afectar el acceso al mercado [10].

En cuanto al cálculo del potencial económico para la generación eléctrica a partir de los recursos de la biomasa, la estimación se realizó teniendo en cuenta las siguientes consideraciones: la metodología se aplica únicamente en instalaciones dedicadas a la combustión, sin incluir la co-combustión; el método empleado tiene en cuenta solo los recursos de biomasa sólida. Bajo estas consideraciones, la bioenergía no presenta algún potencial económico [10].

### 2.3.4. Potencial de mercado

El potencial de mercado es la cantidad de energía que se espera generar a través del despliegue comercial de las tecnologías renovables después de considerar el impacto de los factores de mercado actuales o futuros, como los incentivos y otras políticas, reglamentos, respuesta de inversores y la competencia económica de otras fuentes de generación [5].

### 2.4. An inventory of bioenergy potential of British Columbia-Canada

El documento "An Inventory of the Bioenergy Potential of British Columbia", fue presentado por BIOCAP Canadá, Fundación cuyo objetivo principal era generar soluciones integradas para lograr abordar retos como el cambio climático y la energía limpia [11].

Este estudio se llevó a cabo con el fin de estimar el potencial para la producción sostenible de la biomasa como fuente de energía renovable de la Columbia

Británica, en la investigación se consideraron cuatro fuentes de energía las cuales son: residuos sólidos urbanos, residuos agrícolas (residuos de cultivos, residuos animales, cultivos en tierras secas y en tierras agrícolas) silvicultura y residuos forestales.

En cuanto a los residuos animales se supone que es posible recuperar el 85 % del estiércol de las aves y cerdos, el 25 % de bovinos y el 10 % de corderos, esta fracción del estiércol es conocido como factor recuperable [12].

Para determinar el potencial bioenergético del estiércol animal BIOCAP propone llevar a cabo los siguientes pasos:

a) Determinar la cantidad total de animales por cada tipo (bovino, porcino, caprino, etc.)

b) Determinar la cantidad total de estiércol por cada tipo y subtipo de ganado

c) Determinar el contenido de energía del estiércol

d) Estimar el potencial bioenergético de acuerdo a la ecuación 9.

$$PB: H_i * MPR_i * FR * EC \quad (9)$$

Donde:

$PB$ : Potencial Bioenergético [PJ/año]

$H_i$ : Número de cabezas por tipo de ganado [cabezas/año]

$MPR_i$ : Producción de estiércol [t/cabezas/año]

$FR$ : Factor recuperable [%]

$EC$ : Contenido de energía [GJ/t]

*2.5. Methodology for estimating biomass energy potential and its application to Colombia (Universidad Ferrara – Italia)*

Este documento presenta una metodología con un enfoque en los recursos cuyo objetivo es estimar estocásticamente el potencial energético teórico y técnico de la biomasa residual en Colombia a partir del algoritmo de Montecarlo y su incertidumbre asociada a la calidad y disponibilidad de los datos, las ventajas que considera el desarrollo de esta metodología son: transparencia, reproducibilidad,

bajo costo y la posibilidad de adaptarlo en el análisis a otros países [13].

### 2.5.1. Tipos de potencial energético

**a. Potencial teórico:** máxima cantidad de biomasa disponible

**b. Potencial técnico:** fracción del potencial teórico de acuerdo a las condiciones y restricciones actuales

**c. Potencial ecológicamente sostenible:** fracción del potencial técnico bajo restricciones relacionadas con la conservación de la naturaleza, la preservación del suelo, el agua y la biodiversidad

**d. Potencial económico:** fracción del potencial técnico que satisface criterios económicos [13].

### 2.5.2. Metodología

La metodología definida por los autores se resume en los siguientes pasos [13]:

1. Definir las condiciones del entorno y plantear hipótesis
2. Crear una base de datos a partir de estadísticas nacionales proporcionadas por agencias gubernamentales, agencias internacionales y documentos científicos, así como, datos técnicos recolectados de la literatura disponible
3. Calcular estocásticamente el potencial teórico preliminar para cada tipo de biomasa usando el algoritmo de Monte Carlo, este algoritmo calcula una incertidumbre preliminar y lleva a cabo un análisis de sensibilidad para identificar los principales factores que contribuyen a la incertidumbre
4. Revisar la literatura con el fin de separar las variables en submodelos y mejorar la estimación de las variables claves
5. Recalcular el potencial teórico final y cuantificar la incertidumbre
6. A partir del potencial teórico, calcular el potencial técnico preliminar e identificar las variables claves
7. Revisar nuevamente la literatura con el fin de mejorar la estimación de las variables claves

8. Recalcular el potencial técnico final y cuantificar su incertidumbre
9. Finalmente, los resultados del estudio se evalúan mediante el método de cálculo propuesto y se comparan con los resultados actuales

### 2.5.3. Formulación matemática

Los potenciales energéticos de los recursos animales se calculan teniendo en cuenta la cantidad de biogás producido a través del proceso de biodigestión a partir del estiércol de los diferentes animales (m corresponde al tipo de animal: cerdos, gallinas, vacas y caballos y n corresponde al grupo etario de cada tipo). Las ecuaciones (10) y (11) corresponden a la formulación matemática definida para la estimación del potencial teórico y técnico de los recursos de biomasa residual pecuaria.

$$Q_{AR} = \sum_m \sum_n H_{m,n} * f_{m,n} * b_{m,n} * LHV_{m,n} \quad (10)$$

Donde:

$Q_{AR}$ : Potencial teórico [MJ/año]

$H_{m,n}$ : Cantidad de ganado [cabezas]

$f_{m,n}$ : Producción de estiércol por cabeza [ t/cabezas]

$b_{m,n}$ : Rendimiento del biogás a partir del estiércol [m<sup>3</sup>/t]

$LHV_{m,n}$ : Poder Calorífico Inferior [MJ/ m<sup>3</sup>]

$$Q_{AR}^T = \sum_m \sum_n H_{m,n} * f_{m,n} * b_{m,n} * LHV_{m,n} * a_{m,n} \quad (11)$$

Donde:

$Q_{AR}^T$ : Potencial técnico [MJ/año]

$a_{m,n}$ : Factor de disponibilidad

El factor de disponibilidad para el caso de residuos animales es definido por los autores como el porcentaje de las granjas a mediana y gran escala donde se puede llevar a cabo la recolección de los residuos, de esta manera asignan un intervalo entre el 24% y el 12%. El factor de disponibilidad se desagrega en subcomponentes como muestra la ecuación (12).

$$a = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 \quad (12)$$

Donde  $\alpha_1, \alpha_2... \alpha_5$ , representan restricciones geográficas, de mercado, técnicas, ambientales y especiales [14].

## 2.6. Harmonization of biomass resource assessments–Europa

Biomass Energy Europe (BEE) es un proyecto el cual se centra en armonizar las metodologías y los datos para la evaluación de los recursos de biomasa residual con fines energéticos en Europa y sus países vecinos, así como, mejorar la coherencia, precisión y fiabilidad de manera que sea posible planificar una transición a la energía renovable en la Unión Europea. Los residuos objeto de investigación son: los residuos forestales, agrícolas, animales y cultivos energéticos [15]. Como resultado de la investigación se presentan documentos como: “Harmonization of biomass resource assessments”, donde se definen conceptos relacionados con los tipos de potencial energético, así como la formulación matemática que permiten su estimación.

### 2.6.1. Tipos de potencial energético

Los tipos de potencial definidos en el documento son [15]:

1. **Potencial teórico:** cantidad máxima de biomasa terrestre considerada teóricamente disponible para la producción de bioenergía.
2. **Potencial técnico:** fracción del potencial teórico bajo condiciones técnico–estructurales de acuerdo a condiciones actuales.
3. **Potencial económico:** fracción del potencial técnico que cumple con los criterios de rentabilidad económica.
4. **Potencial de aplicación:** fracción del potencial económico que considera los incentivos políticos, restricciones económicas, institucionales y sociales e impactos ambientales.
5. **Potencial de aplicación sostenible:** integración de criterios de sostenibilidad económica, social y ambiental para evaluar los recursos de biomasa.

### 2.6.2. Método estadístico para la estimación del potencial energético

El método estadístico para estimar el potencial teórico y técnico que propone BEE aplicado a los

residuos animales se resume en las ecuaciones (13), (14) y (15) [15].

$$THP_{manure} = \sum N_{heads_i} * MpH_i \quad (13)$$

$$Energy_{manure} = \sum N_{heads_i} * MpH_i * BY_i * GEC_i \quad (14)$$

Donde:

$THP_{manure}$ : Potencial teórico del estiércol [t/año]

$N_{heads_i}$ : Número de cabezas por tipo de ganado [cabezas]

$MpH_i$ : Cantidad de estiércol por tipo de ganado [t/cabeza]

$Energy_{manure}$ : Energía del estiércol [J/año]

$BY_i$ : Rendimiento del biogás [ $m^3/t$ ]

$GEC_i$ : contenido de energía del gas producido [ $J/m^3$ ]

$i$ : tipo de ganado (bovino, cerdos, caballos, etc)

$$TCP_{manure} = \sum N_{heads_i} * LU_{si} * MpU_i * AHD_i * AV_i * UF_i \quad (15)$$

Donde:

$TCP_{manure}$ : Potencial técnico del estiércol [t/año]

$N_{heads_i}$ : Número de cabezas for tipo de ganado [cabezas]

$LU_{si}$ : Número de unidades de ganado mayor por cabeza para cada tipo de ganado

$MpU_i$ : Cantidad de estiércol por tipo de ganado [t/cabeza-día]

$AHD_i$ : Número de alojamiento de animales por año [días/año]

$AV_i$ : Factor de disponibilidad (Porcentaje de estiércol que técnicamente se puede recoger de los establos)

$UF_i$ : Factor de uso (Porcentaje de estiércol que no tiene importantes alternativas de uso)

## 2.7. An assessment of the potential for non-plantation biomass resources in select Asian countries for 2010 – ASIA

Este artículo presenta una síntesis de la evaluación del potencial energético de recursos de biomasa no plantados en cinco países asiáticos como son: China, India, Filipinas, Sir Lanka y Tailandia, llevado a cabo en el marco del Programa de Investigación Regional Asiática en Energía, Medio ambiente y clima. Los estudios se realizaron a nivel nacional para estimar el potencial energético de residuos primarios, secundarios, estiércol animal, forestal y residuos sólidos urbanos [16].

### 2.7.1. Estimación del potencial energético de residuos animales

La cantidad de producción de estiércol en los animales depende de factores como: peso corporal del animal, el tipo, la cantidad de alimento, el estado fisiológico, etc. El potencial energético asociado al estiércol animal está relacionado directamente con su descomposición que puede darse ya sea en un ambiente aerobio donde se produce dióxido de carbono y materiales orgánicos estabilizados o bajo condiciones anaerobias donde adicionalmente se produce metano.

La estimación del potencial energético recuperable del estiércol animal está relacionada con la cantidad de materia seca del estiércol, la fracción de sólidos volátiles, un factor recuperable asociado a la accesibilidad al recurso y la producción de biogás. De acuerdo con lo anterior se propone estimar el potencial a partir de las ecuaciones 16, 17 y 18 [16]. Se recomienda siempre que sea posible usar los valores específicos de cada país.

$$EP_{estiércol} = ABP_{estiércol} * PCI_{Biogás} \quad (16)$$

$$ABP_{estiércol} = DMR * FSV * Y_{Biogás} \quad (17)$$

$$DMR = DM * NA * FR \quad (18)$$

Donde:

$EP_{estiércol}$ : Potencial energético teórico del estiércol [TJ/año]

$ABP_{estiércol}$  : Cantidad de biogás recuperable a partir del estiércol [ $m^3$  Biogás/año]

$PCI_{Biogás}$  : Poder Calorífico Inferior del Biogás [ $MJ/m^3$ ]

$DMR$  : Cantidad de materia seca recuperable [ $kg$  MS/año]

$FSV$ : Fracción de Sólidos Volátiles [ $kg$  SV/ $kg$  MS]

$Y_{Biogás}$  : Rendimiento del Biogás [ $m^3/kg$  SV]

$DM$ : Cantidad de materia seca [ $kg/cabeza$ -año] (producto entre la masa del residuo al año y la fracción de materia seca)

$NA$ : Número de Animales [cabezas]

$FR$ : Cantidad de estiércol recuperable [Adimensional]

La Tabla 1 resume las características principales de cada una de las metodologías descritas anteriormente.

### 3. Hallazgos en la evaluación de las metodologías existentes

De acuerdo al análisis de cada una de las metodologías, presentado en el apartado anterior, se evidencian una serie de limitaciones que se resumen en la Tabla 2.

**Tabla 1.** Metodologías aplicadas para el aprovechamiento de biomasa residual

Estudio	País	Tipo de Potencial	Método	Característica principal
[4]	Colombia	Potencial teórico	Cuantitativo	La estimación del potencial energético se realiza a partir de la caracterización de la biomasa
[6]	Argentina	Potencial teórico, técnico-económico	Cualitativo	Establece criterios de evaluación de los tipos de biomasa disponible y de los procesos de conversión
[7], [8]	Estados Unidos	Potencial teórico, técnico y económico	Cuantitativo	Establece sistemas de manejo de estiércol y sistemas de generación centralizada.
[11]	Canadá	Potencial teórico	Cuantitativo	Define el factor recuperable como el porcentaje real aprovechable de un recurso
[13], [14]	Italia	Potencial teórico y técnico	Cuantitativo	Establece un valor de incertidumbre asociado a la calidad y disponibilidad de los datos. Define el factor de disponibilidad el cual representa restricciones geográficas, de mercado, técnicas, ambientales y especiales.
[15]	Europa	Potencial teórico y técnico	Cuantitativo	Contempla en la estimación del potencial energético factores de uso y disponibilidad del recurso
[16]	Asia	Potencial teórico	Cuantitativo	La estimación del potencial energético se realiza a partir de la caracterización de la biomasa

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 2.** Problemas y limitaciones de las metodologías evaluadas

LIMITACIONES POR PAÍS DE ESTUDIO	COLOMBIA	ARGENTINA	USA	CANADÁ	ITALIA	EUROPA	ASIA
Altos valores de incertidumbre en los resultados	X		X	X		X	X
Calidad y disponibilidad de los datos	X					X	
Dificultades al reproducir los cálculos	X				X	X	
Criterios innecesarios que deben ser omitidos o modificados		X	X				
No es aplicable a otros países puesto que tiene en cuenta características específicas			X	X		X	
Excluye los recursos de biomasa gaseosa			X				
No considera el factor recuperable del recurso	X	X	X				
No considera la caracterización de la biomasa		X	X	X	X	X	
No considera los sistemas a pequeña escala			X	X	X	X	

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta la información de la Tabla 2, se evidencia la necesidad de formular una metodología que unifique los conceptos de potencial energético teórico y técnico, proponga una formulación matemática clara que considere las características propias del recurso y facilite la reproducción de los cálculos y establezca una serie de pasos que permitan el aprovechamiento de los recursos de biomasa residual de una forma que esté al alcance tanto de granjas a gran escala como de granjas familiares que estén interesadas en este tipo de proyectos.

De acuerdo con lo anterior se propone una metodología a la cual se denomina “APRENDYSAGE” con el fin de resolver algunas de las limitaciones encontradas en los documentos anteriores y facilitar el aprovechamiento de los recursos de biomasa residual pecuaria a través de una herramienta clara que permita proyectar la implementación de sistemas de autogeneración de electricidad a partir de otras fuentes energéticas no convencionales.

#### 4. Metodología para el aprovechamiento de desechos animales y sistemas de autogeneración “Metodología APRENDYSAGE”

La metodología APRENDYSAGE se plantea con el objetivo de generar un modelo que permita la implementación de sistemas de autogeneración a partir de fuentes renovables de energía teniendo en cuenta las limitaciones de las metodologías actuales y las necesidades propias del país. Por tanto, define los conceptos de potencial energético teórico y técnico, establece fórmulas matemáticas para cada caso y propone una serie de pasos para el uso de los recursos de biomasa residual pecuaria como fuente de energía eléctrica.

##### 4.1. Potencial teórico

Se define como la máxima cantidad de biomasa terrestre teóricamente disponible para la producción de bioenergía dentro de los límites biofísicos fundamentales (uso de los recursos naturales, disposición de los residuos, biodiversidad, etc.)

El potencial teórico comprende la cantidad total disponible del recurso, está asociado al rendimiento y poder calorífico del biogás considerando el porcentaje de metano obtenido a partir de la digestión de los residuos de tipo animal, La ecuación (19) permite determinar el potencial energético teórico [5].

$$P_{TR} = \sum_m \sum_n C_{m,n} * P_{e_{m,n}} * FSV * b_{m,n} * PCI_{biogás} \quad (19)$$

$$PCI_{biogás} = PCI_{metano} * \% CH_{4m} \quad (20)$$

$$C_{biogás} = C_{m,n} * P_{e_{m,n}} * FSV * b_{m,n} \quad (21)$$

Donde:

$P_{TR}$ : Potencial teórico [MJ/año]

$C_{m,n}$ : Cabezas de ganado [cabezas]

$P_{e_{m,n}}$ : Producción de estiércol [kg/cabeza\*año]

$FSV$ : Fracción de sólidos volátiles [kgSV/kg]

$b_{m,n}$ : Rendimiento del Biogás [m<sup>3</sup>/kgSV]

$PCI_{biogás}$ : Poder calorífico del biogás [MJ/m<sup>3</sup>]

$PCI_{metano}$ : Poder calorífico del metano [MJ/m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>]

$\% CH_{4m}$ : Porcentaje de metano de acuerdo al tipo de animal [%]

$C_{biogás}$ : Cantidad de biogás

$m$ : tipo de animal

$n$ : grupo etario por tipo de animal

De acuerdo con la formulación matemática se establece un valor asociado al poder calorífico del metano de 33,948MJ/m<sup>3</sup> [17]. Para establecer el poder calorífico del biogás se deberá tener en cuenta un porcentaje de metano propio del recurso por tipo de animal [5].

##### 4.2. Potencial técnico

El potencial energético técnico se define como la cantidad de energía eléctrica producida a partir del potencial teórico de la biomasa. En este caso es necesario identificar características como: la disponibilidad de recurso (factor recuperable), recolección y transporte del residuo, rendimiento del sistema (eficiencia eléctrica de la tecnología y ruta de conversión) y las condiciones geográficas y ambientales del entorno.

El factor recuperable ( $Fr$ ) indica un porcentaje aproximado del total de estiércol animal que puede recuperarse, el cual varía dependiendo si el ganado se encuentra o no estabulado, generalmente en Colombia el ganado no es estabulado por tanto de acuerdo con [18] el porcentaje aprovechable del estiércol animal no estabulado es aproximadamente el 12.5% del total producido.

Para determinar la tecnología de conversión a partir de los residuos pecuarios, se evalúan las rutas de conversión definidas en la cadena electroenergética con el fin de establecer la eficiencia eléctrica del sistema requerido para el cálculo del potencial técnico. El cálculo del potencial técnico se hace a partir de la ecuación (22).

$$P_{TC} = P_{TR} * Fr * \eta * F_C \quad (22)$$

$$\eta = \eta_{el} * \eta_B \quad (23)$$

Donde:

$P_{TC}$ : potencial técnico [kWh/año]

$P_{TR}$ : potencial teórico [MJ/año]

$F_R$ : factor recuperable [%]

$\eta$ : eficiencia del sistema [%]

$\eta_{el}$ : eficiencia eléctrica asociada a la tecnología de conversión (celdas electroquímicas, motor a combustión o microturbinas) [%]

$\eta_B$ : eficiencia asociada a la ruta de conversión (biodigestor, gasificador, caldera) [%]

$F_C$ : factor de conversión de Joule a kWh. 3,6 MJ = 1 kWh o 1 MJ = 0,277 kWh [19].

#### 4.3. Metodología general para el aprovechamiento de la biomasa residual pecuaria

La metodología APRENDYSAGE establece los siguientes pasos con el fin de aprovechar los desechos animales para la generación de energía eléctrica a partir de sistemas de autogeneración y su interconexión a la red eléctrica convencional [5].

1. Identificar la ubicación del sitio (coordenadas geográficas) y las características propias de la zona (condiciones climáticas, temperatura, humedad relativa). Esta información se

puede extraer de páginas como Google Earth, las bases de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la página de la NASA <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi>

2. Clasificar y cuantificar el ganado de acuerdo a su grupo etario con el fin de estimar la cantidad de recurso disponible. Ejemplo: En el caso del sector bovino la clasificación etaria está dada por: Terneros (< a 12 meses), Novillas (12 – 24 meses), Vaca de primer parto (24 – 36 meses) y vacas de producción (> a 36 meses)
3. Determinar las características fisicoquímicas del residuo. La caracterización del residuo se realiza a partir de la toma y el análisis (fisicoquímico y microbiológico) de las muestras (residuo) en un laboratorio. Actualmente estos valores son extraídos de la literatura debido a la carencia de bases de datos con este tipo de información y al alto costo asociado a los análisis. El anexo 3 del documento de [5] presentan una recopilación de datos que permiten continuar con la estimación del potencial energético.
4. Calcular el potencial energético teórico a partir de la ecuación (19).
5. Definir la ruta de conversión teniendo en cuenta el porcentaje de humedad del recurso. La biomasa residual pecuaria en el sector bovino y porcino es superior al 70% siendo la digestión anaerobia (biodigestión) la ruta más apropiada para su aplicación, en cuanto a los residuos avícolas el contenido de humedad es inferior al 50% por tanto se puede escoger una ruta termoquímica (combustión o gasificación) para el tratamiento de estos residuos. El potencial técnico contiene un ítem asociado a la eficiencia del elemento principal de la ruta de conversión (ejemplo: en el caso de los biodigestores se establece una eficiencia del 90%)
6. Definir la tecnología de conversión (microturbinas, motores de combustión interna o celdas electroquímicas). La generación de electricidad a partir del biogás obtenido de los recursos de biomasa residual se lleva a cabo a partir de tecnologías de conversión electromecánicas como el motor de combustión interna, las turbinas a gas o microturbinas de conversión electroquímicas

como las celdas de combustible. Actualmente la tecnología más empleada en la generación de energía eléctrica son los motores de combustión interna debido a su costo y eficiencia. El potencial técnico incluye la eficiencia del sistema de conversión con el fin de establecer un parámetro de evaluación de cada tecnología.

7. Calcular el potencial técnico a partir de la ecuación (22) y determinar la cantidad de energía eléctrica generada a partir del recurso.
8. Evaluar la posibilidad de entregar excedentes a la red eléctrica convencional. Si la energía eléctrica que se genera a partir de los recursos de biomasa residual pecuaria satisface el 100% de la carga y genera excedentes se puede considerar su venta al distribuidor de energía a partir de la interconexión de plantas de autogeneración a la red eléctrica convencional.
9. Consultar la normatividad aplicable para la interconexión de plantas de autogeneración a partir de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable. El capítulo 3 del documento de [5] resume el marco regulatorio vigente para las fuentes no convencionales de energía renovable en Colombia.

## 5. Conclusiones

El estiércol (biomasa residual pecuaria) de ganado vacuno depende de factores como: peso corporal del animal, alimentación, estado fisiológico, entre otros. Por tanto, se recomienda la construcción de una base de datos del análisis fisicoquímico de diferentes muestras con el fin de proporcionar información confiable que pueda usarse como referencia para la estimación del potencial energético teórico y técnico.

Es posible aumentar la cantidad de recurso aprovechable implementando sistemas de estabulación parcial o total del ganado bovino, que en el caso de Colombia presenta un porcentaje casi nulo, situación que conlleva a que sea más viable el aprovechamiento de los recursos de biomasa residual avícola, porcina o la mezcla de estas.

Se evidencia la falta de información para estimar el potencial energético de los recursos de biomasa residual pecuaria, por tanto, es necesario recurrir a fuentes de información secundarias y otras ajenas al país que ocasionan porcentajes de incertidumbre

considerables que afectan los resultados debido a que las características propias de los recursos en cada país son diferentes. Por otra parte, se evidencia que el marco regulatorio de las fuentes no convencionales de energía renovable no está totalmente definido por los entes encargados y en algunos casos es necesario recurrir a las normas definidas para los proyectos de centrales termoeléctricas e hidroeléctricas.

Dentro de la fórmula para el cálculo del potencial energético teórico se puede obtener la cantidad de biogás producido a través del recurso y con este resultado estimar el aprovechamiento de biogás como biocombustible para cocción y la aplicación en sistemas de calefacción como alternativa adicional a la generación de electricidad.

Se considera necesario realizar la aplicación de este tipo de metodologías a casos reales con el fin de establecer su aplicabilidad partiendo de bases de datos de las características propias del país (clima, humedad, recursos disponibles, etc) y de las tecnologías de conversión disponibles en cada región.

## Referencias

- [1] IRENA, “REthinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation” International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi. United Arab Emirates, 2017.
- [2] XM—Expertos en Mercados S.A. E.S.P, “Informe de Operación del SIN y Administración del Mercado 2016” XM, Medellín, Informe anual, Mayo 2017 [En línea]. Disponible en: <http://informesanuales.xm.com.co/2016/SitePages/operacion/Default.aspx>.
- [3] Congreso de Colombia, “Ley 1715 2014” 13 Mayo 2014. [En línea]. Disponible en: [http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY\\_1715\\_2014.pdf](http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf)
- [4] UPME, “Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia” 2010. [En línea]. Disponible en: <https://biblioteca.minminas.gov.co/pdf/ATLAS%20POTENCIAL%20ENERGETICO%20BIOMASA%20RESIDUAL%20COL.%20UPME.pdf>
- [5] A. Ladino y J. Martínez, “Repositorio Institucional Universidad Distrital RIUD” 4 Octubre 2016. [En línea]. Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/4065>

- [6] S. Manrique, J. Franco, V. Nuñez y L. Seghezzeo, "Propuesta metodológica para la toma de decisiones sobre bioenergía en un contexto complejo y diverso" *AVERMA*, vol 15, pp. 39-47, 2011.
- [7] A. Lopez, B. Roberts, D. Heimiller, N. Blair y G. Porro, "U. S. Renewable Energy Technical Potential: A GIS- Based Analysis" Julio 2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51946.pdf>
- [8] A. Milbrandt, "A Geographic Perspective on the Current Biomass Resource Availability in the United States" Diciembre 2005. [En línea]. Disponible en: <https://www.afdc.energy.gov/pdfs/39181.pdf>
- [9] U.S. EPA, "State Workbook: Methodologies for Estimating Greenhouse Gas Emissions" Noviembre 1992. [En línea]. Disponible en: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/900A0E00.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1991+Thru+1994&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&>
- [10] A. Brown, P. Beiter, D. Heimiller, C. Davidson, P. Denholm, J. Melius, A. Lopez, D. Hettinger, D. Mulcahy y G. Porro, "Estimating Renewable Energy Economic Potential in the United States: Methodology and Initial Results" July 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/64503.pdf>
- [11] "BIOCAP CANADÁ" 1998. [En línea]. Disponible en: <http://www.cesarnet.ca/biicap-archive/about.php>
- [12] P. Ravelic y D. Layzell, "Biocap Canadá" 15 Noviembre 2006. [En línea]. Disponible en: [http://www.cesarnet.ca/biicap-archive/images/pdfs/BC\\_Inventory\\_Final-06Nov15.pdf](http://www.cesarnet.ca/biicap-archive/images/pdfs/BC_Inventory_Final-06Nov15.pdf)
- [13] M. Gonzales, M. Morini, M. Pinelli, P. Ruggero, M. Venturini, M. Finkenrath y W. Poganietz, "Methodology for estimating biomass energy potential and its application to Colombia" *Applied Energy*, vol. 136, pp. 781-796, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.004>
- [14] M. Gonzales, M. Venturini, W.-R. Poganietz, M. Finkenrath y P. Ruggero, "Metodology for improving the reability of biomass energy potential estimation" *Biomass and Bioenergy*, vol. 88, pp. 43-58, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.03.026>.
- [15] "Biomass Energy Europe (BEE)" diciembre 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.eu-bee.eu/>
- [16] S. Bhattacharya, P. Abdul Salam, H. Runqing, H. Somashekar y D. R. P. Y. Racelis, "An assesment of the potential for non-plantation biomass resources in selected Asian countries for 2010" *Biomass & Bioenergy*, vol. 29, 2005, pp. 153-166, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.03.004>
- [17] Agrowaste, "Estudio de viabilidad de una planta de biogás" 2013. [En línea]. Disponible en: [http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/ECONOMIC\\_STUDY\\_BIOGAS.pdf](http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/ECONOMIC_STUDY_BIOGAS.pdf)
- [18] F. Rosillo, P. de Groot y S. Hemstock, "The Biomass Assessment Handbook: Bioenergy for a sustainable environment", 2nd. Ed. Londres: Earthscan, 2007.
- [19] J. A. Martínez, "La biomasa como fuente de energía renovable" *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, pp. 32-42, N° 1, 2005 [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1124056>