



Ingeniería en  
**Energías  
Renovables**

# TECNOLOGÍAS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LA BIOMASA FORESTAL





## **TECNOLOGÍAS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LA BIOMASA FORESTAL**

### **AUTOR:**

**DAGOBERTO ARIAS AGUILAR, Ph. D.**  
*COORDINADOR DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN  
DENDROENERGÍA, TECNOLÓGICO DE COSTA RICA*

### **RECONOCIMIENTO TÉCNICO:**

**CÉSAR AUGUSTO ALVARADO**  
**FARAH MARCELA GIRÓN**

**DICIEMBRE 2017**

# CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	5
TIPOS DE BIOMASAS.....	7
TIPOS DE BIOMASAS SEGÚN SU ORIGEN.....	7
BIOMASA PRIMARIA: PLANTAS.....	7
BIOMASA SECUNDARIA: HERBÍVOROS Y SUS RESIDUOS.....	7
BIOMASA TERCIARIA: CARNÍVOROS Y SUS RESIDUOS.....	7
TIPOS DE BIOMASA SEGÚN SU NATURALEZA.....	8
BIOMASA VEGETAL.....	8
BIOMASA ANIMAL.....	9
OTRAS VALORACIONES RELEVANTES DE LA BIOMASA.....	9
FUENTES DE BIOMASA PARA FINES ENERGÉTICOS.....	9
BIOMASA NATURAL.....	9
BIOMASA RESIDUAL.....	10
BIOMASA PROVENIENTE DE EXCEDENTES DE COSECHAS AGRÍCOLAS.....	10
BIOMASA PRODUCIDA MEDIANTE CULTIVOS ENERGÉTICOS.....	12
ROL DE LAS PLANTACIONES DENDROENERGÉTICAS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA.....	15
¿POR QUÉ PENSAR EN LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA SOSTENIBLE PARA EL MUNDO?.....	19
LAS COCINAS MEJORADAS COMO OPCIÓN TECNOLÓGICA.....	23
OPORTUNIDADES PARA LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA.....	27
VALORACIÓN ENERGÉTICA DE BIOMASA, USOS Y TENDENCIAS.....	29
BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS.....	30
BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y SU RELACIÓN CON LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS.....	32
BIOENERGÍA EN LAS AMÉRICAS.....	33
PROCESOS DE CONVERSION DE LA BIOMASA EN ENERGIA.....	35
PROCESOS TERMOQUÍMICOS.....	36
COMBUSTIÓN.....	36
CALDERAS.....	38
SOBRE LA ESCALA DE LOS PROYECTOS DE COMBUSTIÓN BASADOS EN LA BIOMASA.....	40

GASIFICACIÓN.....	44
CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE LAS MADERAS.....	46
PIRÓLISIS.....	49
SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA.....	51
COSTOS.....	53
LOGÍSTICA Y CADENAS DE SUMINISTRO.....	54
COSTOS DE LAS PLANTAS DE TRANSFORMACIÓN A ENERGÍA.....	55
ESTUDIOS DEL EFECTO DE DIFERENTES FACTORES (ESPACIAMIENTOS, ESPECIES, EDADES Y SITIOS). PRUEBAS DE LABORATORIO APLICABLE A LA BIOMASA SEGÚN NORMAS ESTANDARIZADAS.....	57
PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN.....	59
ESTABLECIMIENTO DE PLANTACIÓN.....	59
DETERMINACION DE LA PRODUCTIVIDAD.....	59
ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	59
MUESTREO DE ÁRBOLES EN LA PLANTACIÓN Y MUESTREO EN EL ÁRBOL.....	60
DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD, PESO ESPECÍFICO Y DENSIDAD VERDE.....	60
DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y ENERGÉTICAS.....	60
ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	60
MUESTREO Y PREPARACIÓN DEL MATERIAL.....	60
DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA.....	61
BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA DE ESTA SECCIÓN.....	63
BIBLIOGRAFÍA.....	67

# INTRODUCCIÓN

La biomasa es actualmente transformada mediante diversas tecnologías para la obtención de productos alternativos a los obtenidos a partir del petróleo, en un mercado tradicionalmente dominado por los hidrocarburos. La evolución del precio del petróleo y su tendencia ascendiente en los últimos años debido a la creciente demanda mundial y agotamiento en las explotaciones de este recurso, son factores que favorecen el desarrollo de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de la biomasa como recurso renovable.

La bondad de los proyectos hidroeléctricos en algunos países tiene también sus riesgos ante la variabilidad climática que obliga mantener la energía de respaldo mediante las plantas termoeléctricas. Ante este escenario, los países buscan diversificar la matriz energética mediante fuentes renovables.

**En este campo de las energías renovables, las principales aplicaciones de la biomasa son las siguientes:**

- Obtención de energía eléctrica/térmica a través de la biomasa como combustible:
  - Valorización directa de la biomasa. Obtención de energía térmica y/o eléctrica.
  - Valorización indirecta de la biomasa. Obtención de gas combustible, biocombustibles líquidos (bioalcoholes, biodiesel), residuos sólidos del tratamiento térmico (carbón vegetal y cenizas).
- Obtención de productos químicos: materias químicamente simples a través de procesos de síntesis a partir de gases, productos de fermentación y destilación, entre otros procesos.

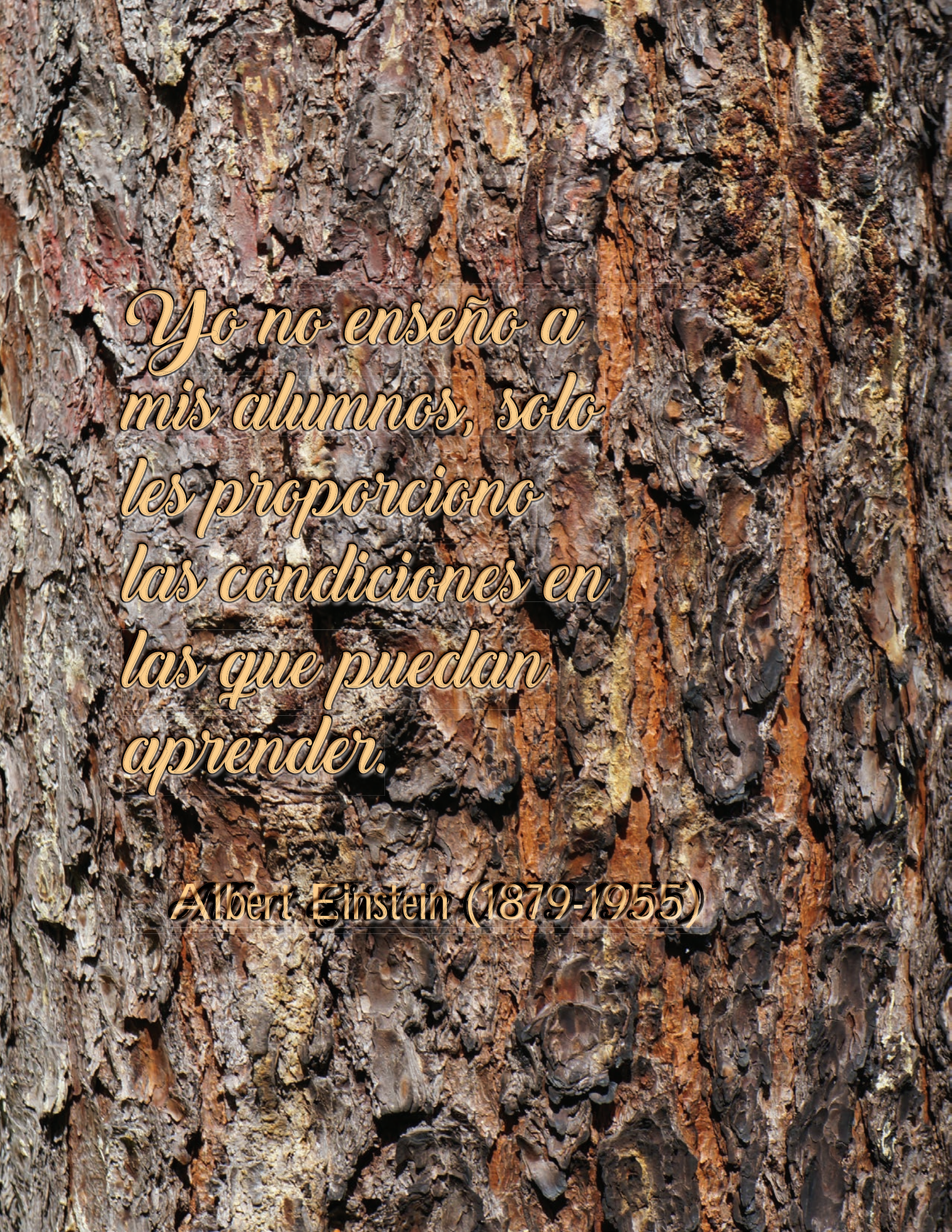
Muchas de las técnicas utilizadas con la biomasa se han utilizado durante años, algunas de ellas perdurando en la actualidad (Ejemplo: uso de la leña en los hogares). Otras técnicas son de reciente implementación y demostración (gasificación) y otras parecen tener un buen potencial para llegar a ser técnicas futuras concebibles, aunque no se haya demostrado aún su aplicación directa y rentabilidad para un uso industrial (pirólisis).

Por otro lado, la obtención de productos químicos a partir de recursos renovables es también en la actualidad objeto de estudio a escala internacional. En el marco de la Química Verde la investigación se enfoca en la búsqueda de nuevos productos menos contaminantes a partir de recursos forestales, agrícolas, cultivos energéticos u otros residuos de origen lignocelulósico, substituyendo a los actuales productos químicos de procedencia no-renovable.

En este manual se introducirán los conceptos más relevantes sobre los procesos de transformación de la biomasa en subproductos y las tecnologías para producir electricidad.

Existen múltiples formas de convertir la biomasa en energía, siendo las más comunes la combustión o el utilizar métodos mecánicos, termoquímicos, biológicos y químicos para producir biocombustibles. Cuando hablamos de recursos primarios bioenergéticos nos referimos a la aplicación directa de la biomasa para producir energía. Mientras que los recursos secundarios bioenergéticos es la biomasa ya convertida en biocombustibles, sean en forma sólida, líquida o gaseosa; para distintos usos energéticos, como la producción de electricidad, calefacción o transporte.

La conversión termoquímica puede ser aplicada a todos los tipos de biomasa. Algunos tipos de transformación termoquímica son por combustión, gasificación, pirólisis o licuefacción. Las tecnologías de combustión son las tecnologías más utilizadas y maduras. La gasificación y la pirólisis son cada vez más importantes. Mientras que la licuefacción se utiliza raramente en la actualidad, pero también tiene una vasta historia comercial.



*Yo no enseño a  
mis alumnos, solo  
les proporciono  
las condiciones en  
las que puedan  
aprender.*

*Albert Einstein (1879-1955)*

# TIPOS DE BIOMASAS

---

Para conocer los tipos y usos de la biomasa es importante categorizar los distintos tipos que existen. En este apartado distinguiremos las biomosas de acuerdo a su origen, a su naturaleza y a las fuentes de las que se obtiene.

## TIPOS DE BIOMASAS SEGÚN SU ORIGEN

La ecología distingue los siguientes tipos de biomosas dependiendo del origen de la materia orgánica:

### **BIOMASA PRIMARIA: PLANTAS**

Es la materia orgánica formada por los seres fotosintéticos, como algas, plantas verdes y demás seres autótrofos (organismos capaces de sintetizar las sustancias esenciales para su metabolismo a partir de sustancias inorgánicas; es decir, que no necesitan de otros seres vivos para su nutrición).

Se incluye toda la biomasa vegetal, incluso los residuos agrícolas (como los tallos de piña, broza del café, rastrojo de la piña o los remanente de las podas y cosechas) y los residuos forestales (como la leña, el aserrín, las ramas y parte de la copa). (San Miguel y Gutiérrez, 2015)

### **BIOMASA SECUNDARIA: HERBÍVOROS Y SUS RESIDUOS**

Es producida por los seres que usan en su nutrición las plantas verdes o algas que componen la biomasa primaria.

Este tipo de biomasa implica una transformación biológica de la biomasa primaria para formar un nuevo tipo de biomasa de naturaleza distinta a la inicial. Ejemplos de esto son las carnes y los excrementos producidas por los animales herbívoros. (San Miguel y Gutiérrez, 2015)

### **BIOMASA TERCIARIA: CARNÍVOROS Y SUS RESIDUOS**

Es producida por los seres que se alimentan de la biomasa secundaria, como sería el caso de los carnívoros que se alimentan de herbívoros.

# TIPOS DE BIOMASA SEGÚN SU NATURALEZA

## BIOMASA VEGETAL

En términos generales la materia orgánica de los vegetales está compuesta de la siguiente manera:

- 60% por hidratos de carbono, principalmente en formas de compuestos lignocelulósicos o amiláceos.
- 25% por proteínas.
- 6% por lípidos.
- 9% por elementos minerales.

Aunque es importante reseñar que la biomasa vegetal no es igual en todos los órganos de una planta. Algunos ejemplos de órganos con abundancia particular de ciertos componentes son los siguientes:

- Abundancia de proteínas.  
Ejemplos: semillas de algunas legumbres.
- Abundancia de lípidos.  
Ejemplos: algunos frutos y las semillas de oleaginosas, como soya, maní, girasol, maíz y otros.
- Abundancia de azúcares.  
Ejemplos: raíz de la remolacha y el tallo de la caña.
- Abundancia de polisacáridos de reserva.  
Ejemplos: cereales y tubérculos como la papa. (San Miguel y Gutiérrez, 2015)

La biomasa vegetal se califica dependiendo del grupo de compuestos preponderante en su composición. Al ser los hidratos de carbono los compuestos más abundantes, la clasificación obedece principalmente a la forma en que se encuentran prioritariamente estos compuestos. Existen las siguientes determinaciones:

- **Biomasa lignocelulósica:** es en la que predominan las holocelulosas (celulosa y emicelulosa) y la lignina. Ejemplos: madera, leña, aserrín
- **Biomasa amilácea:** es en la que los hidratos de carbono predominantes se encuentran en forma de polisacáridos de reserva, tales como almidón o inulina. Ejemplos: cereales y papas.
- **Biomasa azucarada:** en la que el principal componente hidrocabonato está constituido por azúcares, ya sean monosacáridos (glucosa o fructosa principalmente) o disacáridos (sacarosa). Ejemplos: remolacha y el tallo de la caña. (San Miguel y Gutiérrez, 2015).



## BIOMASA ANIMAL

En cuanto a la biomasa animal, la proporción de proteínas, lípidos e hidratos de carbono es muy diferente a la que se da en los vegetales. Hay una disminución considerable del contenido en hidratos de carbono y un aumento en el contenido proteico y lípido. (San Miguel y Gutiérrez, 2015).

## OTRAS VALORACIONES RELEVANTES DE LA BIOMASA

La biomasa también puede ser calificada de acuerdo al contenido hídrico:

- **Biomasa semiseca, húmeda o fresca:** Con más de un 13% de contenido de humedad.
- **Biomasa seca:** con menos de un 13% de contenido de humedad. (San Miguel y Gutiérrez, 2015).

Un tejido vegetal fresco puede llegar a tener hasta más de un 90% de agua, como es el caso de las algas. Rastrojo de piña, residuos de banano y la broza del café tienen altos contenidos de humedad.

También podemos categorizar la biomasa de acuerdo a su contenido de aceites u otros compuestos:

- **Biomasa oleaginosas:** Tienen gran contenido de aceite. **Ejemplo:** semillas de Tempate. (*Jatropha curcas*), la higuera, el coyol, el girasol y las aceitunas.
- **Biomasa laticíferas:** tienen hidrocarburos y esteroides como productos específicos de su metabolismo secundario. **Ejemplo:** los árboles cuyos troncos sirven para extraer látex y otras resinas. Las coníferas en general (pino, ciprés, araucaria) (San Miguel y Gutiérrez, 2015).

Aunque la proporción relativa de los compuestos lípidos es mayor a lo normal en las plantas oleaginosas y laticíferas, sigue siendo una pequeña proporción en relación a la biomasa total de las plantas que los producen.

Además, existe la categorización de biomasa proteica, de las cuales existen ejemplos tanto en el reino animal como el vegetal. Sin embargo, su uso para fines energéticos no es completamente viable ya que estos productos son la base para la alimentación y alcanzan precios elevados como alimentos y su combustión no es la más adecuada debido a la elevada producción de óxidos de nitrógenos (muy oxidantes para los compuestos de hierro y potencialmente nocivos para la salud humana). Son especialmente utilizados en otras latitudes para procesos de biodigestión. (San Miguel y Gutiérrez, 2015).

## FUENTES DE BIOMASA PARA FINES ENERGÉTICOS

### BIOMASA NATURAL

Es la producida naturalmente en los bosques y demás tierras no cultivadas. Este tipo es la que el hombre ha utilizado tradicionalmente para satisfacer sus necesidades, como la leña. A nivel mundial es uno de los recursos más ampliamente utilizados y genera un impacto ambiental considerable.

No es la biomasa apropiada para el aprovechamiento energético masivo, debido al riesgo de deforestación. Aunque algunos residuos provienen de partes muertas o las podas y raleos que se realizan para evitar incendios forestales y también como elemento de manejo para potenciar el crecimiento de los árboles. (San Miguel y Gutiérrez, 2015).

## **BIOMASA RESIDUAL**

Se produce en las explotaciones agrícolas, forestales o ganaderas, y en los residuos orgánicos de las industrias y de las ciudades y pueblos.

Ofrece perspectivas atrayentes pero limitadas, siendo su principal beneficio la descontaminación producto de la eliminación de residuos.

A nivel muy local constituye una alternativa muy interesante para generar modelos de autosuficiencia energética en aquellas industrias e instalaciones que aprovechan sus residuos para generar energía, como el caso de granjas, porcinas, aserraderos, plantas de transformación agroindustrial, industrias que quieran sustituir el uso de combustibles fósiles y centros de acopio de basura. (San Miguel y Gutiérrez, 2015).

### **Entre las ventajas de utilizar la biomasa residual para producir energía, están:**

- Se reduce la contaminación y el deterioro ambiental por los volúmenes de residuos.
- Los costos de producción son reducidos.
- Reduce la peligrosidad de acumular residuos como el caso del aserrín.
- Reduce el espacio que se tendría que destinar a la acumulación de desechos.
- Se reducen los gastos de transporte, ya que los residuos son utilizados para su aprovechamiento en distancias cercanas de las mismas instalaciones en las que se producen. (San Miguel y Gutiérrez, 2015).

## **BIOMASA PROVENIENTE DE EXCEDENTES DE COSECHAS AGRÍCOLAS**

El uso de excedentes agrícolas para convertirlos a combustibles debe ser una cuestión coyuntural u ocasional, no una situación constante. Aunque los cultivos como el banano, la palma aceitera y la piña, con áreas de plantación que superan los miles de hectáreas, generan una cantidad de residuos de manera permanente y todavía se investiga, como en el caso de la piña, la mejor forma de recuperar la energía contenida en la biomasa (Figura 1).

Es importante tener en cuenta que los cultivos con los que se producen este tipo de biomasa tienen fines alimenticios, por lo que su utilización para generar energía resulta a precios superiores a los combustibles que intentan sustituir y, por lo tanto, no son competitivos para el mercado. (San Miguel y Gutiérrez, 2015).



**FIGURA 1:** RESIDUOS QUE QUEDAN EN EL CAMPO DESPUÉS DE LA COSECHA DE LA FRUTA. AL FONDO UN BIODIGESTOR EXPERIMENTAL DE RANGO TERMOFÍLICO CON PANELES SOLARES PARA AUMENTAR LA TEMPERATURA DEL PROCESO.

Es importante tener en cuenta que los cultivos con los que se producen este tipo de biomasa tienen fines alimenticios, por lo que su utilización para generar energía resulta a precios superiores a los combustibles que intentan sustituir y, por lo tanto, no son competitivos para el mercado. (San Miguel y Gutiérrez, 2015).

## **BIOMASA PRODUCIDA MEDIANTE CULTIVOS ENERGÉTICOS**

Se trata del uso de especies arbustivas que son manejadas como un cultivo intensivo para producir biomasa con fines energéticos. Suelen ser de tipo herbáceo o leñoso y en ocasiones pueden ser las mismas especies utilizadas para la reforestación tradicional, aunque con diferentes densidades de siembra y un paquete de manejo más intensivo.

Al seleccionar un cultivo para la producción de biomasa con fines energéticos, lo más importante es valorar que se obtenga de forma rentable, la mayor cantidad de energía neta, de acuerdo a las condiciones climáticas y de suelo de cada zona. En todo caso, la cantidad de energía producida debe sobrepasar la cantidad de energía tradicional empleada en las operaciones de cultivo, recolección y preparación del biocombustible. Adicionalmente su manejo debe garantizar un uso sostenible del suelo y del recurso hídrico. (San Miguel y Gutiérrez, 2015).

### **CUADRO 1: CARACTERÍSTICAS DESEABLES EN LOS CULTIVOS CON FINES ENERGÉTICOS.**

- Económicamente viables: Deben tener altos niveles de productividad en biomasa con bajos costos de producción, de forma que los biocombustibles resulten más baratos que los combustibles de origen fósil.
- No competir con la industria alimentaria: Para que sean viables deben tener la posibilidad de desarrollarse en tierras de baja productividad o tierras agrícolas no utilizadas para cultivos alimentarios.
- Permiten un manejo agroforestal y el uso combinado de las tierras forestales para producción de madera o otros subproductos.
- Maquinaria convencional: Deben permitir los esquemas de trabajo con maquinaria también utilizable por otros cultivos propios de la zona.
- Sostenibles: Deben ser cultivos que no contribuyan a la degradación del ambiente, de forma que el balance medioambiental sea superior al que se produciría si la tierra no estuviese cultivada o fuera ocupada por un cultivo tradicional o sucesión vegetal.
- Energéticamente viable: Que la cantidad de energía neta contenida en la biomasa supere con creces la energía gastada en el cultivo y en la producción de los biocombustibles.
- Mejorar el suelo: Brindar la posibilidad de que las tierras utilizadas puedan ser recuperadas o rehabilitadas para cultivos tradicionales si las condiciones socioeconómicas así lo llegan a requerir.

**FUENTE:** *TECNOLOGÍAS PARA EL USO Y TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA ENERGÉTICA. SAN MIGUEL Y GUTIÉRREZ, 2015.*

En algunos países, como Brasil (con la caña de azúcar), Estados Unidos y Alemania (con el maíz), la generación de biocombustibles basados en los cultivos energéticos ya es una realidad. En los países de la Unión Europea incluso ya se desarrollan proyectos para el aprovechamiento de las tierras agrícolas de poco uso para la producción de biomasa energética (caso de la producción de metano por biodigestión). (San Miguel y Gutiérrez, 2015).

### **Algunos cultivos propicios en la producción de biomasa lignocelulósica para empleo como combustibles son:**

- Especies arbóreas cultivadas en alta densidad y cortas sucesivas, en tierras con climas y condiciones de suelo adecuados. **Ejemplos:** eucaliptos, leucaena (*Leucaena macrophylla*), madero negro (*Gliricidia sepium*), melina (*Gmelina arborea*), guácimo (*Guazuma ulmifolia*) y otra variedad de especies con gran potencial.
- Especies herbáceas de alta producción. **Ejemplos:** pasto de *Arundo donax*, *Pennisetum purpureum* y *Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum* y tabaco arbóreo (*Nicotiana glauca*). (San Miguel y Gutiérrez, 2015)

Entre los cultivos propicios para biocarburantes (aquellos que sirven para el transporte), se consideran dos grupos:

- Oleaginosos, que son adecuados para la producción de biodiesel. Ejemplos: Palma aceitera, Coyol y Tempate. En el caso de Higuera y otras especies se esperan aceites con mayor valor agregado en la industria química y farmacéutica.
- Biomasa transformable en etanol, que son aquellos ricos en azúcares o polisacáridos fermentables. Ejemplos: Cereales, remolachas y caña de azúcar, como cultivos tradicionales. Sorgo azucarero como cultivos prometedores para esta actividad. (San Miguel y Gutiérrez, 2015).



*Aprender sin  
reflexionar es  
malgastar la  
energía.*

*Confucio (551 A.C. - 478 A.C.)*



# ROL DE LAS PLANTACIONES DENDROENERGÉTICAS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA

---

Las plantaciones dendroenergéticas están consideradas dentro del esquema de manejo de las plantaciones con fines ambientales y productivos. En la práctica siguen los mismos principios y procedimientos para el establecimiento y manejo de una plantación forestal tradicional. La diferencia radica en los distanciamiento de siembra que van desde los 2,000 hasta los 300,000 tallos por hectárea, por ello se conocen también como plantaciones de alta densidad. Su objetivo y manejo es la producción de biomasa con fines energéticos (Figura 2).

Plantación dendroenergética: cultivo forestal establecido en altas densidades de siembra cuyo manejo intensivo está destinado a la producción de biomasa con fines energéticos. Es importante que este modelo de plantación considere la sostenibilidad ambiental.



**FIGURA 2: VISTA DE UNA PLANTACIÓN DENDROENERGÉTICA DE 6 MESES DE EDAD CON CLONES DE LA ESPECIE GMELINA ARBOREA EN SAN CARLOS, COSTA RICA 2017.**

Los proyectos de factibilidad para el desarrollo de industrias para la producción de biocombustibles sólidos y para la generación eléctrica a partir de la biomasa forestal, conllevan a la generación de convenios con propietarios forestales y con organizaciones para que sean ellos los que entreguen la biomasa requerida a las futuras plantas de generación. La idea es fomentar el uso de un recurso forestal que será utilizado por una industria asociada, y los beneficios son cuantificados desde el punto de vista económico, ambiental y social.



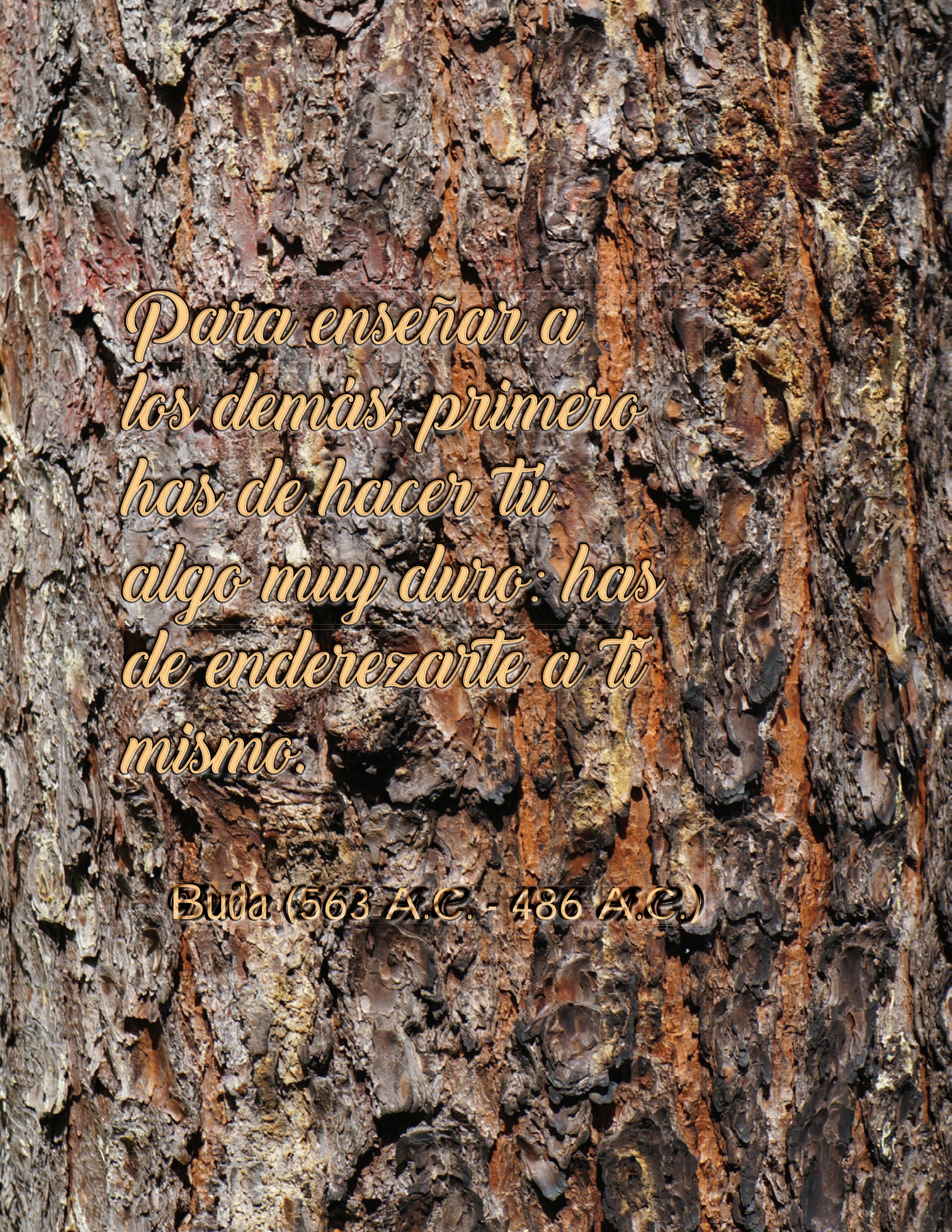
Con o sin un reconocimiento del Estado por el pago de servicios ambientales, los árboles acumulan carbono en la biomasa aérea y subterránea. La recuperación de los suelos es algo más particular y se incrementan en poco tiempo las reservas de carbono en el suelo. Sin embargo, un sistema silvicultural de rotaciones cortas, como es el de las plantaciones dendroenergéticas, requiere la consideración explícita del concepto de sitio forestal, una adecuada combinación de clima, suelo y vegetación, para sentar las bases de sostenibilidad.

En los países de Centroamérica con excepción de Costa Rica no existe un modelo de pago de servicios ambientales para las plantaciones dendroenergéticas, pero una persona privada, empresa u organización puede establecer plantaciones con objetivos dendroenergéticos y lo pueden hacer en cualquier terreno cumpliendo con la normativa vigente y respetando la legislación forestal en cuanto a las zonas de protección de los recursos hídricos y las áreas de conservación.

Naturalmente tiene que estar bien definido quien será el comprador de la biomasa producida y los precios, para lo cual lo ideal son los contratos previos. Debe considerarse que las plantaciones dendroenergéticas son solo una parte de una matriz energética ambientalmente amigable, socialmente responsable y económicamente viable. No se puede sustentar un plan de generación de bioenergía o diversificar la actual matriz energética solo con biomásas, sino que, por el contrario, se deben integrar a una estrategia nacional para la generación de energía. Cualquier persona puede establecer una plantación de este tipo, pero dado que involucra altos niveles de rendimiento y alta demanda de recursos, tales como material genético, agua, nutrientes, preparación física del suelo y otros insumos, deben ser establecidos según criterios técnicos en sitios con las combinaciones de clima y suelo más favorables para su crecimiento (Figura 3). Además deberían ser incluidos factores topográficos y de accesibilidad, pues la mecanización o semi-mecanización es inevitable en la gestión de este tipo de cultivo dendroenergético cuando hablamos de mayor escala.



**FIGURA 3:** *PLANTACIONES COMERCIALES DE TECA (TECTONA GRANDIS) DE 5 AÑOS DE EDAD QUE MUESTRA MUY BAJA PRODUCTIVIDAD POR LA FALTA DE MANEJO DE LOS SUELOS Y LA FERTILIDAD. SI EN SU LUGAR SE ESTABLECIERA UNA PLANTACIÓN DENDROENERGÉTICA, DE LA MISMA MANERA SE DEBE PROCURAR UN MANEJO TECNOLÓGICO DEL SUELO.*



*Para enseñar a  
los demás, primero  
has de hacer tu  
algo muy duro: has  
de enderezarte a ti  
mismo.*

*Buda (563 A.C. - 486 A.C.)*

# ¿POR QUÉ PENSAR EN LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA SOSTENIBLE PARA EL MUNDO?

---

Los recientes acuerdos tomados en París durante la COP21, llevada a cabo entre el 30 de noviembre al 11 de diciembre del 2015, llevan a un entendimiento de un mayor esfuerzo por evitar que el aumento de la temperatura global supere los 1.5 grados centígrados, dado que este aumento tendría un efecto devastador sobre muchas zonas vulnerables, en especial las que se encuentran en países en desarrollo, que aún cuentan con ecosistemas únicos y frágiles, en los cuales se pueden presentar sequías, inundaciones y olas de calor. Por ejemplo, se señaló que entre los años 1994 y 2013 cinco países, de los 10 más afectados a nivel mundial, se ubicaron en América, y que los más afectados fueron Honduras y Haití, seguidos por Nicaragua, Guatemala y República Dominicana. Muy recientemente sobrevivió la afectación para Costa Rica con el reciente paso del evento meteorológico Nate en octubre del 2017.

“Alcanzar las necesidades energéticas básicas de los más pobres en este planeta es un imperativo moral y social que puede y debe alcanzarse en concordancia con objetivos sostenibles” Chu y Goldemberg (2007).

Una de las grandes necesidades para los países de Latinoamérica, es lograr que los más pobres tengan acceso a la energía. Más del 90 % de la población dispone de electricidad en sus viviendas, siendo las zonas rurales, en la mayoría de los países, las que representan a la “población desatendida”, con 17 millones de personas sin acceso a electricidad. En la comparación de los diferentes países, se muestra como el consumo de electricidad implica, en promedio, un crecimiento proporcional del Producto Bruto Interno (Figura 4), pero tiene una relación inversa con la pobreza (Figura 5). Dentro de las necesidades básicas de energía en las zonas rurales se enumeran en importancia: cocción, iluminación y, en las regiones alto andinas, la calefacción de viviendas.

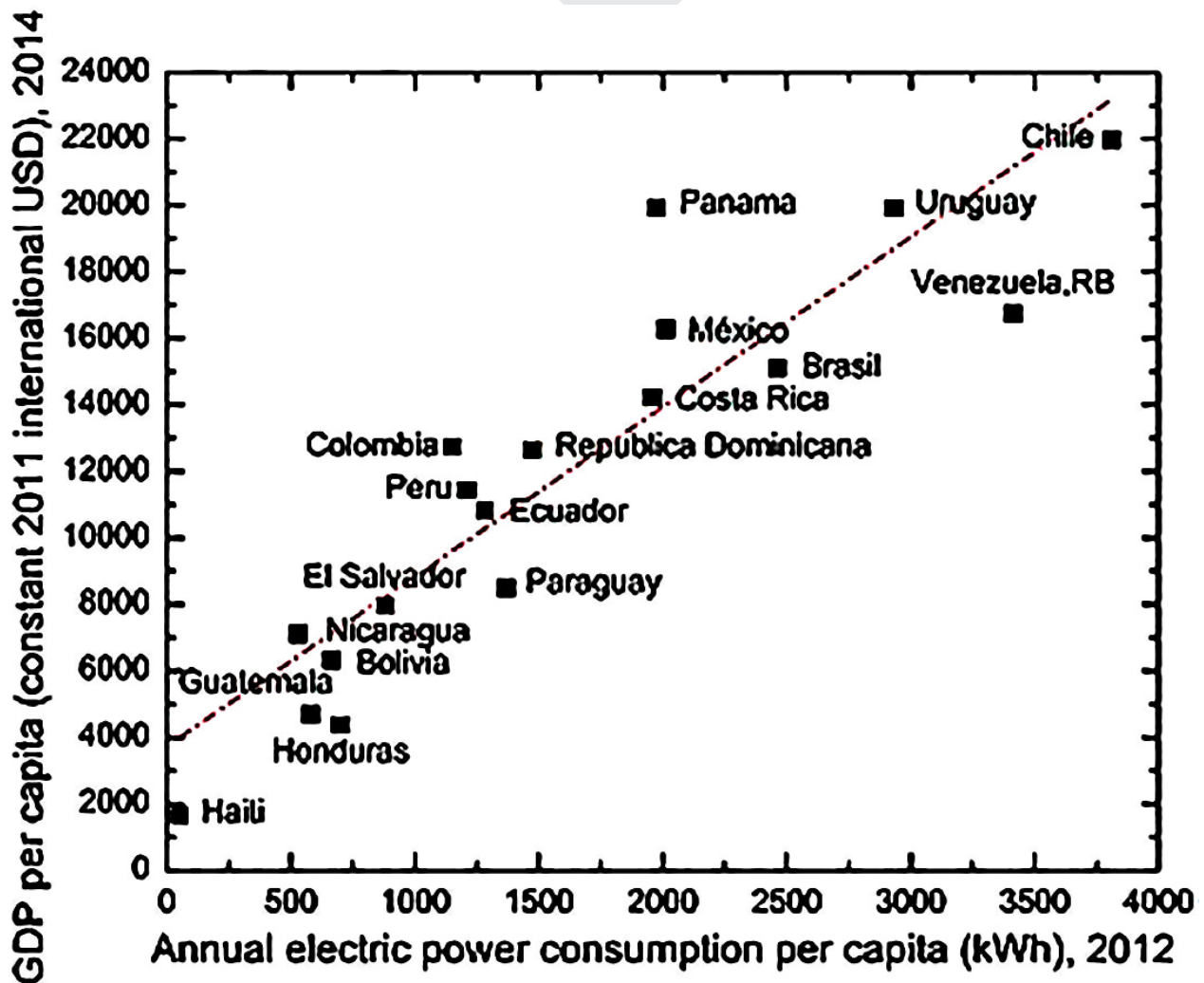
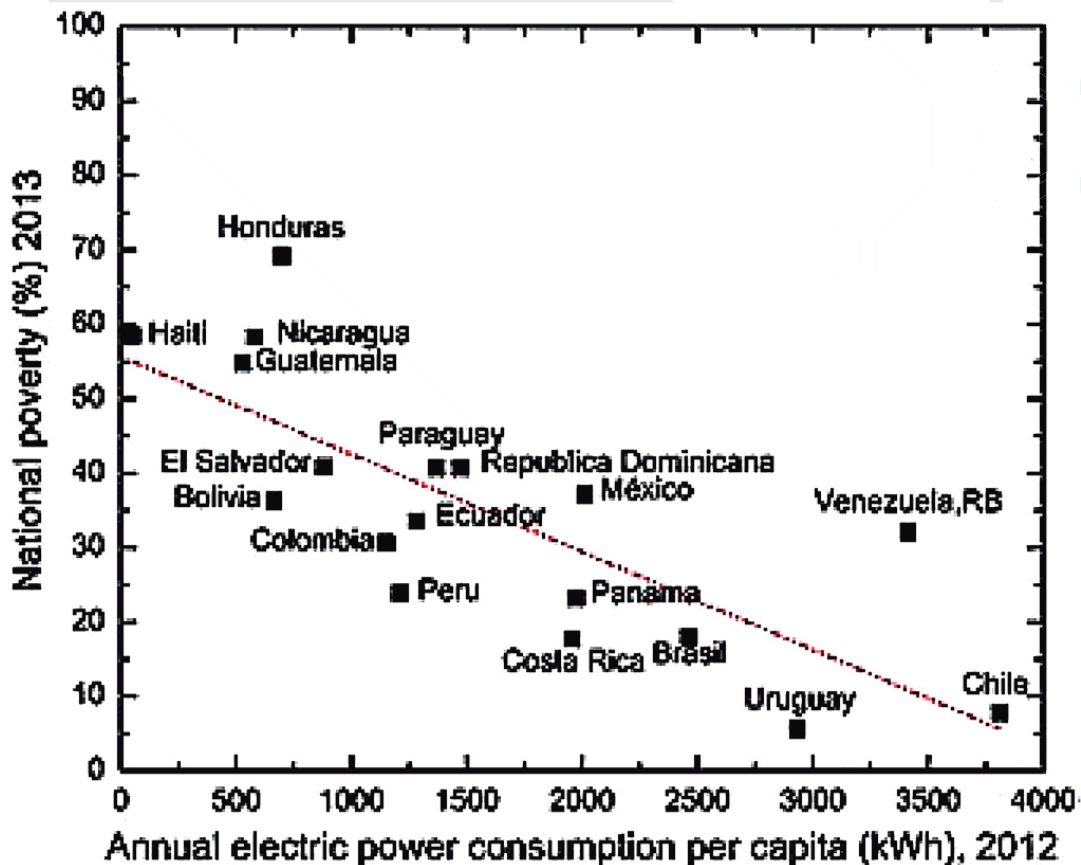


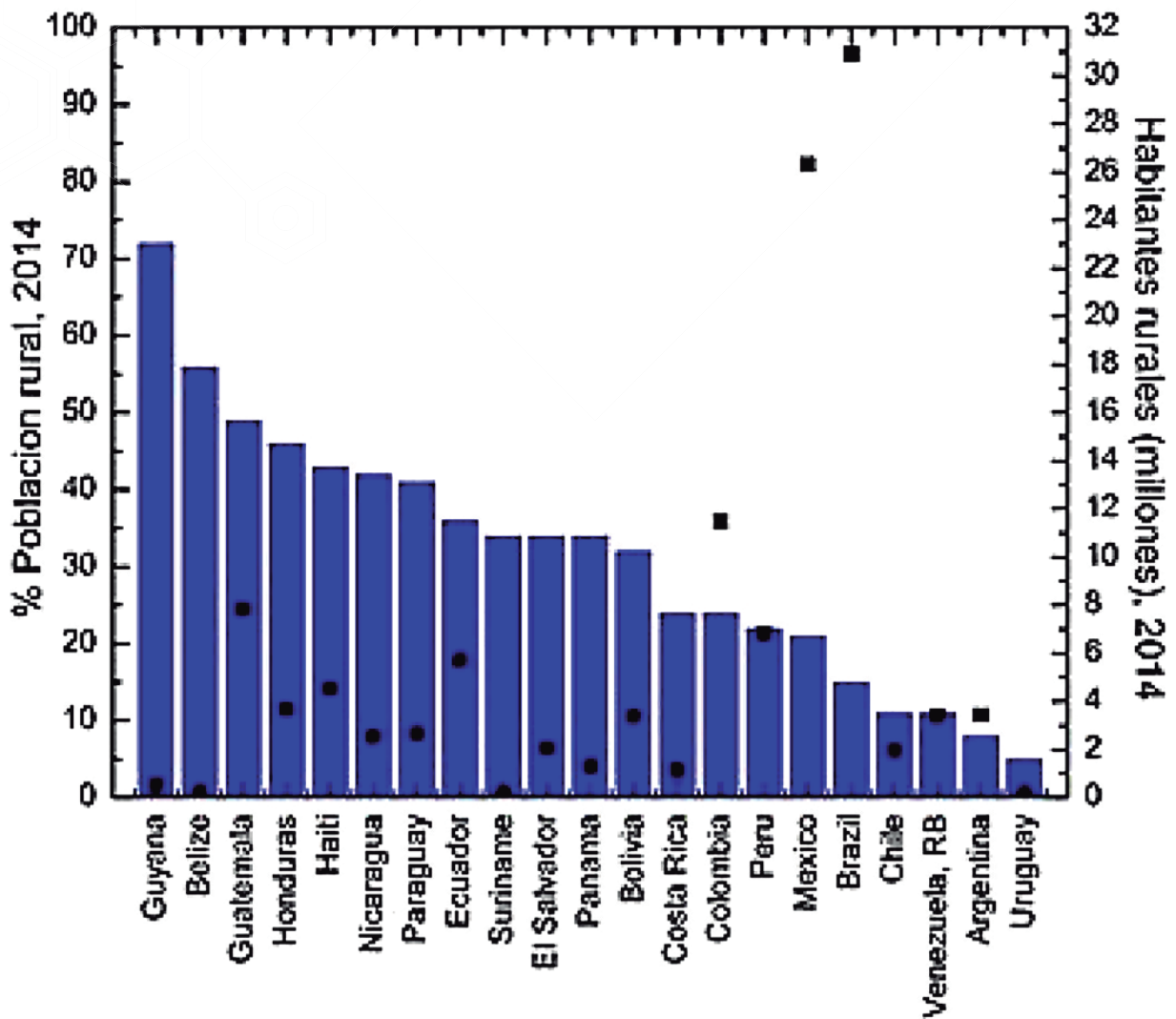
FIGURA 4: CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA PER CÁPITA PARA ALGUNOS PAÍSES DE LATINOAMÉRICA, RELACIONADO CON EL PRODUCTO BRUTO INTERNO.



**FIGURA 5: CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA PER CÁPITA PARA ALGUNOS PAÍSES DE LATINOAMÉRICA, RELACIONADO CON SU POBREZA NACIONAL.**

Aproximadamente 150 millones de personas en Latinoamérica queman leña o estiércol para cocinar sus alimentos, lo que representa no solo un problema energético, sino también un complejo problema con componentes sociales, de salud y ambientales. En respuesta a esta problemática se ha venido desarrollando una gran diversidad de programas orientados a la instalación de lo que se conoce como cocinas mejoradas. Como ejemplo se describen experiencias notables de algunos países latinoamericanos, en los cuales se han introducido varios millones de estas cocinas mejoradas o se han realizado esfuerzos con otras tecnologías de cocción. Después de la necesidad de energía para cocción, la energía para iluminación sigue en prioridad para la población rural pobre que no dispone de electricidad en su casa, y requiere mecheros y velas para la iluminación. La extensión de las redes eléctricas es muy costosa en estos casos, dada la baja densidad poblacional y el difícil acceso geográfico. Para esta población la solución sostenible más factible actualmente está representada por un sistema fotovoltaico o en una etapa de mayor desarrollo el uso de tecnologías de generación de electricidad con el uso de la biomasa.

De toda la población para la región, aproximadamente igual a 590 millones, se tiene que los habitantes rurales son 111 millones, de los cuales más de 47 millones se encuentran en condición de pobreza, lo que contrasta con los más de 100 millones de pobres ubicados en las zonas urbanas y periurbanas. Sin embargo, la cantidad de pobladores sin acceso a electricidad en las zonas rurales (17 millones) es aún más de tres veces que la ubicada en las zonas urbanas y periurbanas (5 millones). La Figura 6 muestra la relación del porcentaje de población rural con el número de habitantes que los constituyen, con datos al 2014.



**FIGURA 6: RELACIÓN DEL PORCENTAJE DE LA POBLACIÓN RURAL CON EL NÚMERO DE HABITANTES QUE LOS CONSTITUYEN AL 2014.**

A nivel mundial, más de 3,000 millones de personas (casi el 40% de toda la población) queman combustibles sólidos para la cocción de sus alimentos. Este proceso lo realizan empleando mayormente biomasa forestal en forma de leña; que es quemada a fuego abierto dentro de sus viviendas. Esta forma de cocción es un proceso de combustión ineficiente de materia orgánica, que origina partículas sólidas y gases de efecto invernadero (GEI) como: el monóxido de carbono, óxidos nitrosos, óxidos de azufre y compuestos orgánicos; todos ellos de alta toxicidad, directa para los seres vivos e indirecta al ocasionar un gran desbalance en el medio ambiente (Cuadro 2). Más aún, aproximadamente el 25% de emisiones de carbono provienen de la quema de combustibles sólidos para satisfacer las necesidades energéticas en los hogares más pobres. Solo vemos en un contexto mundial, durante el año 2012, se reportó que aproximadamente 4.3 millones de muertes prematuras fueron consecuencia de la contaminación del aire dentro del hogar, cifra que sobrepasa el número de muertes ocasionadas por la malaria y el SIDA. Además, el 50% de estas muertes prematuras se dio para niños menores de 5 años, debido a la neumonía ocasionada por inhalación de partículas sólidas.

**CUADRO 2: EFECTOS SOBRE LA PERSONA Y EL AMBIENTE DE LOS PRODUCTOS ORIGINADOS POR LA COMBUSTIÓN INEFICIENTE DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS.**

PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN INEFICIENTE DE BIOMASA	EFECTOS SOBRE EL SER VIVO	EFECTOS SOBRE EL AMBIENTE
Partículas sólidas	Altamente tóxico para las vías respiratorias	Origina el "smog"
Monóxido de carbono (CO)	Ocasiona falta de oxígeno. Afecta el sistema cardiovascular y nervioso.	GEI.
Óxidos de nitrógeno (NOX)	Causante de procesos patológicos y tumorales. Ocasiona falta de oxígeno.	GEI.
Óxidos de azufre (SOX)	Irritante, afecta mucosas y vías respiratorias.	GEI, origina lluvia ácida, afecta crecimiento de vegetación.

Pero los aspectos de salud y ambiental originados por la contaminación del aire dentro del hogar no son los únicos problemas que caracterizan esta forma de cocción de los alimentos. También se asocian a este proceso problemas sociales que afectan a los sectores más vulnerables de las poblaciones desatendidas, mujeres y niños, dado que la recolección del combustible está generalmente a cargo de ellos. Es decir, el tiempo invertido en conseguir leña debería invertirse en estudiar, para el caso de los niños, y en desarrollar alguna actividad económicamente productiva, para el caso de las mujeres.

## **LAS COCINAS MEJORADAS COMO OPCIÓN TECNOLÓGICA: DEMANDA DE BIOMASA FORESTAL**

Como respuesta a esta problemática, por más de tres décadas, se ha venido desarrollando una gran diversidad de programas orientados a la instalación de lo que se conoce como cocinas o estufas mejoradas. Una amplia gama de ellas se han desarrollado con el objetivo de facilitar su apropiación por parte de la población. La estructura de estas cocinas está constituida básicamente por: una cámara de combustión aislada con una base de adobe y una abertura para el suministro de leña, las hornillas, un canal para la trayectoria de los gases y una chimenea para la eliminación de los mismos. Un esquema general de la cocina mejorada, se muestra en la Figura 7.



**FIGURA 7: DETALLE GENERAL DE UNA COCINA MEJORADA.**

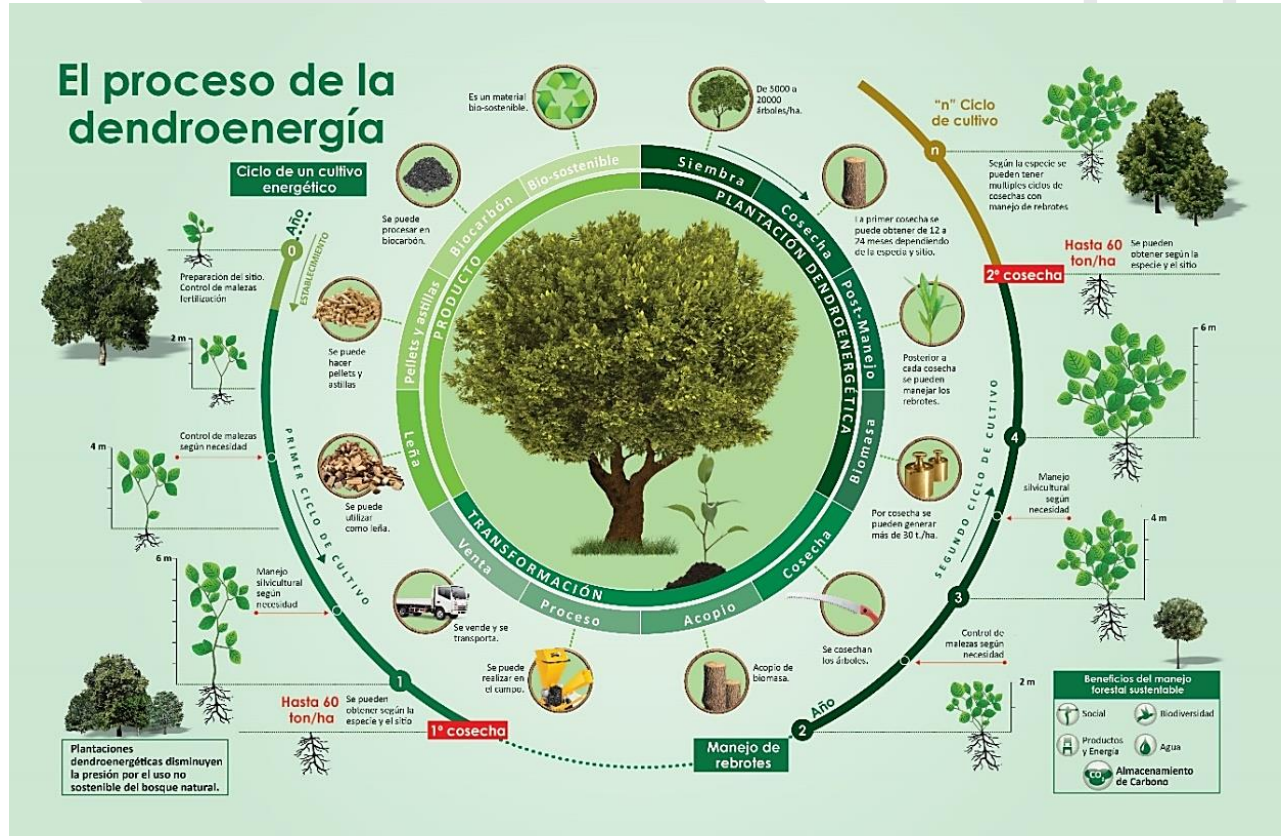
<http://cocinasmejoradasperu.org.pe/noticias/campana-de-venta-de-cocinas-mejoradas-recorrezonas-de-putina-punco-y-alto-inambari-en-puno/>

**Bajo óptimas condiciones de funcionamiento una cocina mejorada, se caracteriza por:**

- El humo de la combustión no ingresa a la casa sino se libera por una chimenea.
- Se minimiza el riesgo de volcamiento de las ollas y por lo tanto de quemaduras.
- Ahorra combustible.
- Concentra el calor.
- La comida no tiene olor a humo y su cocción es más higiénica.
- La persona que cocina se mantiene en mejor postura.

Además, el impacto ambiental es favorable porque aminora la liberación de gases de efecto invernadero y disminuye la deforestación. Aquí cobra especial importancia el concepto de las plantaciones dendroenergéticas para disminuir la presión por el bosque natural (Figura 8). Desde lo familiar hasta lo comunal, un nuevo concepto puede ser introducido y que ya es de uso en varios países: el huerto leñero.





**FIGURA 8. ROL DE LAS PLANTACIONES DENDROENERGÉTICAS COMO SUMINISTRO DE MATERIA PRIMA PARA LAS NECESIDADES DE BIOMASA A NIVEL MUNDIAL Y EL EFECTO DE DISMINUIR LA PRESIÓN POR EL BOSQUE.**

Los huertos leñeros buscan fortalecer la cultura de rescate y protección de la biodiversidad en las comunidades locales y se presentan como una opción para el aprovechamiento sostenible de los recursos del bosque, específicamente de la leña y la madera. Con los huertos leñeros, la presión que ejercen las comunidades sobre estos recursos disminuirá en gran medida y será menor el deterioro que sufra el ecosistema. Adicionalmente, el esfuerzo y el tiempo invertidos por la comunidad en la actividad de conseguir leña y madera serán menores, mejorando su calidad de vida. Todos estos beneficios serán evidentes a mediano y largo plazo, teniendo en cuenta el tiempo que se demoran los árboles en crecer y estar listos para que su leña sea cosechada. Por eso es importante fortalecer el proceso comunitario y la conciencia de que, además de mejorar condiciones cotidianas, estas iniciativas aportan a la construcción de mejores condiciones de vida para las comunidades de todo el territorio y aseguran la subsistencia de las generaciones futuras.

Huerto leñero: una pequeña plantación familiar o comunal con la finalidad de suplir la biomasa para el consumo propio o comunal. Destaca el uso de especies de rápido crecimiento, con capacidad de rebrote y buenas propiedades calorimétricas (Figura 9).



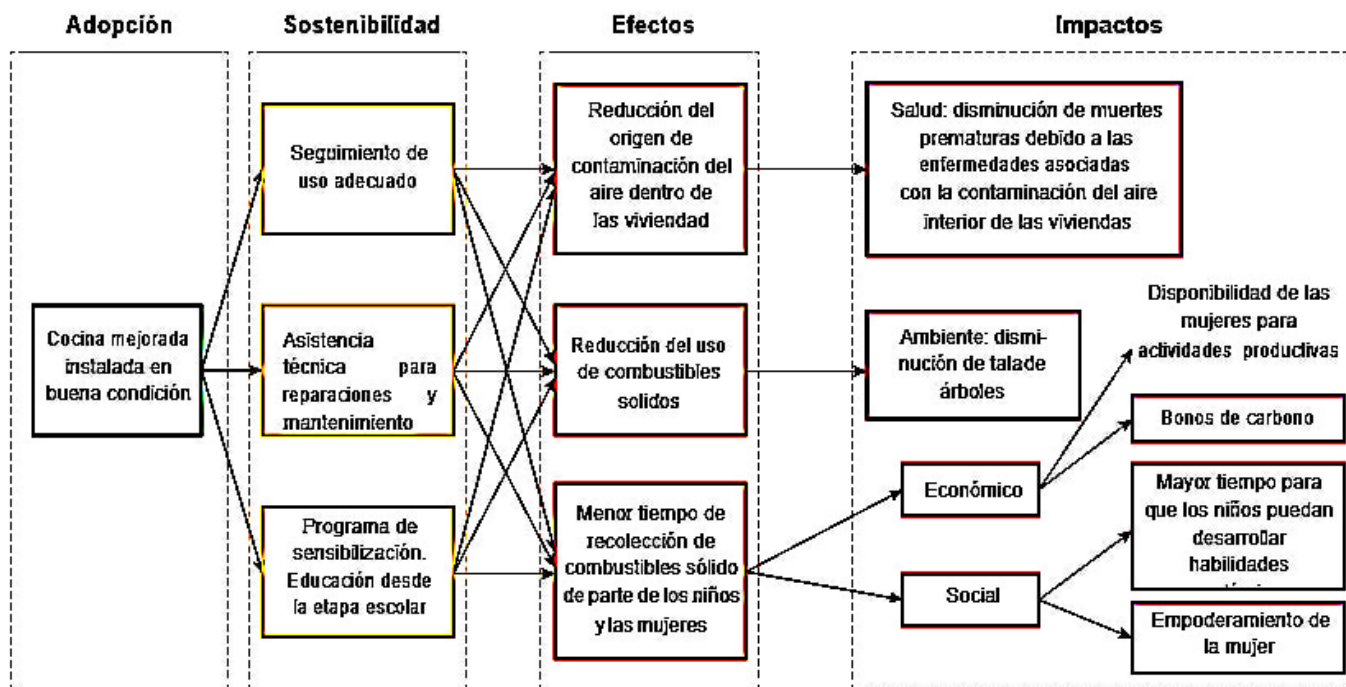
**FIGURA 9: DETALLE DE UN PEQUEÑO HUERTO LEÑERO DE LA ESPECIE MORINGA (MORINGA OLEÍFERA) QUE CUMPLE MÚLTIPLES PROPÓSITOS DENTRO DE LA ECONOMÍA FAMILIAR.**

La experiencia ha mostrado que los programas de asistencia, donde se regalan cocinas mejoradas, no son la mejor forma de generar un proceso sostenible en las poblaciones más desatendidas. Los programas sociales deben buscar el equilibrio entre la protección a los más pobres sin crear un déficit fiscal. Se ha comprobado que los pequeños créditos son opciones viables, pero ellos se pueden promover cuando el futuro usuario está convencido que adquirir la tecnología es beneficio para su desarrollo. Parte de hacer sostenible la apropiación de las cocinas mejoradas como forma de cocción de los alimentos es generar un mercado que facilite su comercialización, ya que, así, el uso de esta tecnología no se va a ver afectado cuando la intervención de un programa de asistencia se suspenda.

Desde el 2010 a nivel mundial, todos los esfuerzos de implementar cocinas mejoradas vienen siendo integrados por la Alianza Mundial para las Estufas Limpias (GACC por sus siglas en inglés Global Alliance for Clean Cookstoves), la cual se fundamenta en un objetivo concreto: "Cocinar no debe matar". La GACC es una Alianza que usa un enfoque basado en el mercado para conseguir la participación de un grupo diverso de actores: Instituciones gubernamentales, organismos no-gubernamentales, empresas y centros de investigación, para trabajar hacia un objetivo común. Uno de sus objetivos definidos es brindar 100 millones de cocinas limpias para el 2020, y alcanzar una intervención prioritaria en 8 países (Bangladesh, China, Ghana, Guatemala, India, Kenia, Nigeria y Uganda).

Actualmente a nivel mundial se cuenta con una amplia gama de modelos de cocinas mejoradas que, como alternativas para la cocción, son viables, factibles y sostenibles pero que, para ser asimiladas por una determinada población, deben pasar necesariamente por responder a sus exigencias.

Conseguir que un programa de adaptación de cocinas mejoradas cumpla los objetivos inicialmente planteados puede presentarse como un proceso de desarrollo constituido por el nexo fuerte entre los aspectos: adopción, sostenibilidad, efectos e impactos. La Figura 10 muestra esta propuesta y cada uno de los componentes del proceso.



**FIGURA 10: PROCESO DE DESARROLLO QUE SE DEBE LLEVAR A CABO PARA OBSERVAR LOS IMPACTOS ESPERADOS EN LA POBLACIÓN QUE ADOPTA EL USO DE COCINAS MEJORADAS.**

## OPORTUNIDADES PARA LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

A pesar del intenso trabajo en el mejoramiento de las cocinas, la mayoría de los sistemas presentan aun diversas deficiencias, lo que dificulta el proceso de apropiación de esta tecnología, cuestionando inclusive su sostenibilidad a largo plazo. Frente a este problema existe una amplia gama de otras propuestas tecnológicas para la cocción entre las que destacan:

- Cocinas mejoradas portátiles.
- Uso de pellets y briquetas de biomasa (Figura 11)
- Cocinas con gasificación
- Cocinas turbo
- Cocinas de GLP
- Cocinas solares



**FIGURA 11:** USO DE BRIQUETAS EN COCINAS MEJORADAS COMO UNA NUEVA OPORTUNIDAD DE UN PRODUCTO DE MAYOR VALOR AGREGADO.

# VALORACIÓN ENERGÉTICA DE BIOMASA, USOS Y TENDENCIAS

---



Existen múltiples formas de convertir la biomasa en energía, siendo las más comunes la combustión o el utilizar métodos mecánicos, termoquímicos, biológicos y químicos para producir biocombustibles.

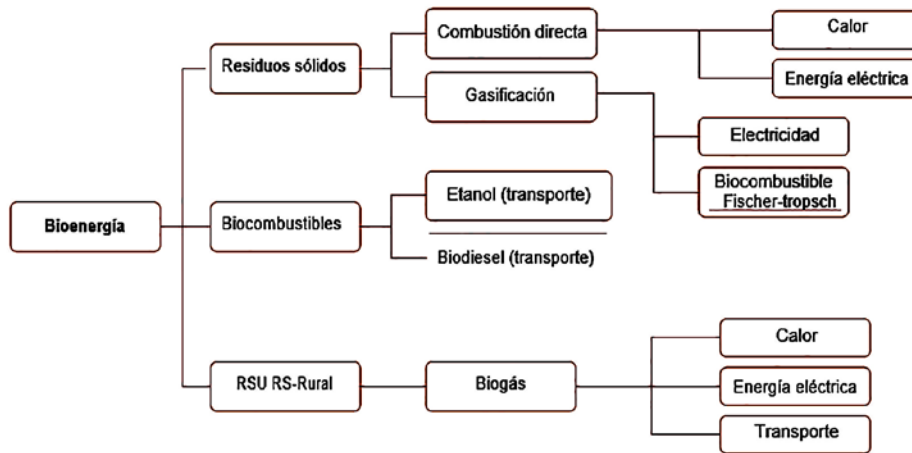
Cuando hablamos de recursos primarios bioenergéticos nos referimos a la aplicación directa de la biomasa para producir energía.

Mientras que los recursos secundarios bioenergéticos es la biomasa ya convertida en biocombustibles, sean en forma sólida, líquida o gaseosa; para distintos usos energéticos, como la producción de electricidad, calefacción o transporte.

El balance del uso de la energía primaria en el mundo, muestra que un 10% proviene de bioenergía, 50 EJ, la cual debido a su versatilidad, se emplea en la producción de energía térmica, eléctrica, y como combustibles de transporte, por lo cual está llamada a tener un papel importante en el futuro cercano y a ser la materia prima que de origen a los productos químicos que hoy obtenemos de los combustibles fósiles en un mediano plazo. En la (Figura 12), se muestran las diferentes formas de aprovechamiento de la bioenergía dependiendo de su fuente inicial.

La biomasa es uno de los recursos renovables con mayor potencial de utilización en la zona intertropical (franja ecuatorial de 23° latitud norte hasta los 23° latitud sur), para la generación de energía eléctrica y térmica, ya que cuenta con condiciones ambientales adecuadas tales como humedad, temperatura y radiación solar durante todo el año.

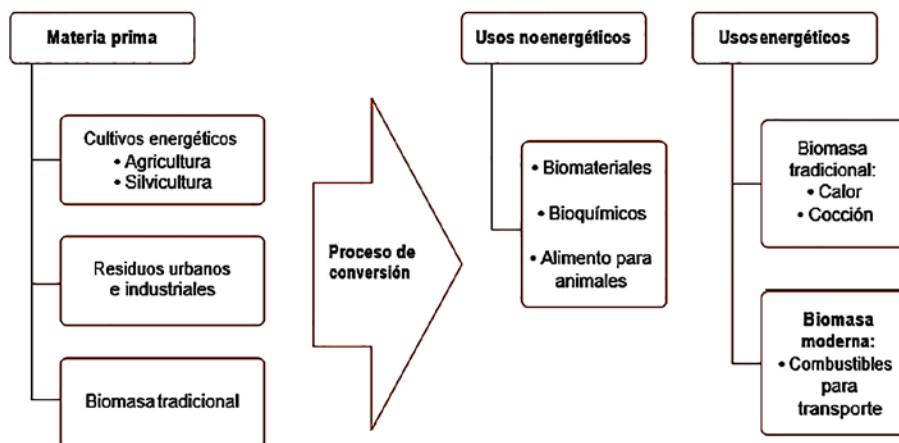
El uso de la bioenergía es diferente según el país o región, participa con el 3% a 15% en los países industrializados, y se incrementa al 22% en los países en desarrollo, cuya utilización principal es en los sistemas de calentamiento y en la cocción de alimentos.



Fuente: Rincón J.M., Gastón R., Islas J.M. | Lizarde J.E., 2014

**FIGURA 12: USO DE LAS DIFERENTES FUENTES DE BIOENERGÍA DEPENDIENDO DE SU FUENTE INICIAL.**

La biomasa, desde el punto de vista energético, se utiliza comúnmente en las plantas de generación o en las de producción combinada de calor y energía (CHP) -cogeneración- ya sea como combustibles gaseosos, normalmente a escalas de 10 kW - 5 MW o como combustible sólido hasta varios cientos de MW, también sirve como materia prima en la producción de biocombustibles líquidos utilizados en el transporte (Figura 13).



Fuente: Rincón J.M., Gastón R., Islas J.M., Lizarde J.E., 2014

**FIGURA 13: PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA.**

## BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

Debido a las propiedades de la biomasa de bajo poder calorífico en comparación con los hidrocarburos, la alta capacidad de retención de humedad y la facilidad de exposición al ataque microbiano, se han desarrollado métodos de densificación energética tales como la torrefacción, las briquetas y la pelletización, que por su alta densidad y uniformidad de los productos obtenidos, hacen que estos sean ideales para su uso en sistemas de combustión automatizados y permiten su transporte masivo a largas distancias.

Algunos países han establecido la industria de los biocombustibles sólidos mediante pellets, como Austria, Suiza y Alemania en Europa; Estados Unidos y Canadá en América, los cuales han desarrollado normas de calidad que garantizan el uso de un producto uniforme en el mercado. En el Cuadro 3, se presentan las principales características de las normas adoptadas en países europeos.

**CUADRO 3: NORMAS DE CALIDAD EUROPEA PARA LA PRODUCCIÓN DE PELLETS.**

Propiedad	Unidad	EN-PLUS (FprEN 14961-2)			Norma M 7135	DIN 51731	DIN plus
		A1	A2	A3			
Origen		Madera no tratada químicamente	Madera no tratada químicamente	Cualquier tipo de madera o corteza			
Diámetro	mm	6(±1) y 8(±1)	6(±1) y 8(±1)	6(±1) y 8(±1)	4 a 10	4 a 10	
Largo	mm	3.15<L<40	3.15<L<40	3.15<L<40	5*D	<50	5*D
Densidad	kg/dm³	>0.6	>0.6	>0.6	> 1.12	1.0 < D < 1.4	>1.12
Humedad	%	<10	<10	<10	<10	<12	<10
Cenizas	%	<0.7	<1.5	<3.0	<0.50	<1,50	<0.50
PC	MJ/kg	>16.5	>16.3	>16	>18	17.5<PC<19.5	>18
Azufre	%	<0.03	<0.03	<0.04	<0.04	<0.08	<0.04
Nitrógeno	%	<0.3	<0.4	<1.0	<0.3	<0.3	<0.3
Cloro	%	<0.02	<0.02	<0.03	<0.02	<0.03	<0.02

Fuente: CONCERREAL, 2011.

Las empresas dedicadas a la producción de pellets tienen una capacidad de 2,000 a 150,000 t/año y están localizadas prácticamente en todos los países europeos. El precio varía según el país, en el año 2006, un GJ valía 17.8 Euros en Alemania, 15.5 en Austria y Suiza, y 8 en España. El uso principal de los pellets es como biocombustible a cambio de gasóleo en pequeñas calderas, normalmente menores de 100 kW, y en hornos de calentamiento de las zonas urbanas.

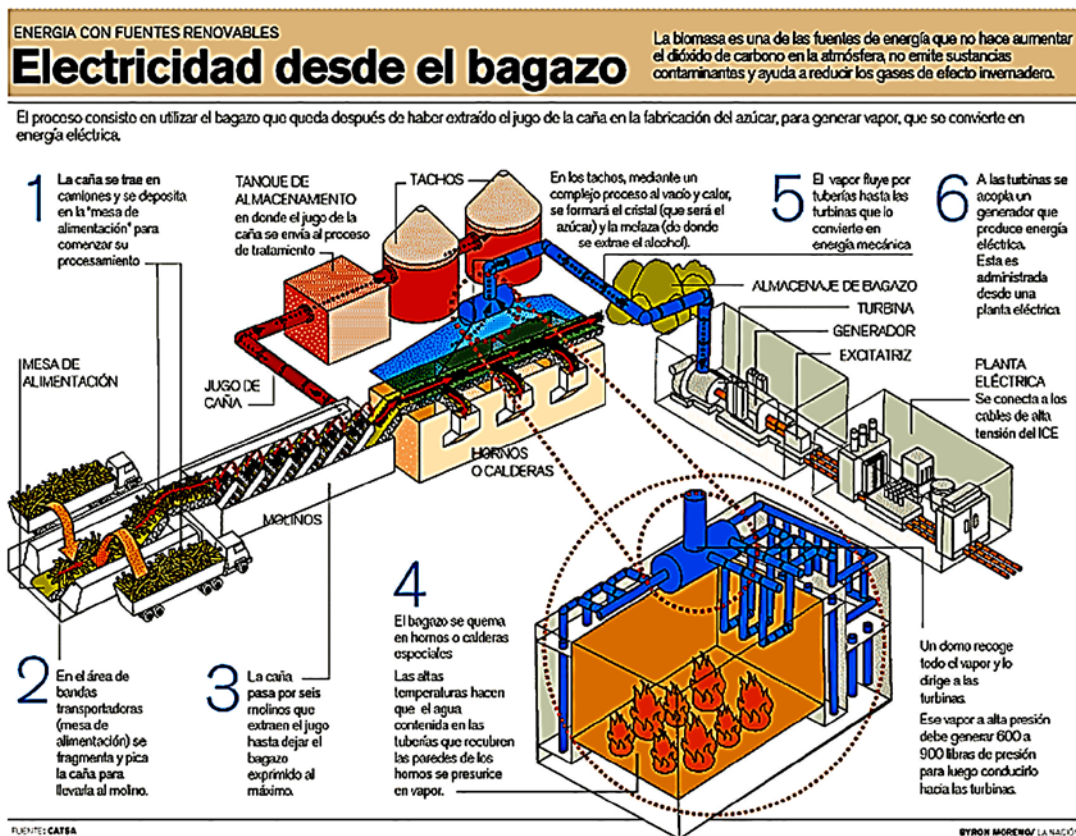
Debido a la necesidad de reducir emisiones de CO<sub>2</sub> de Estados Unidos, se estima que deberá utilizar 5 millones de toneladas de biomasa/día. De esta manera se tendrá que recurrir a cultivos energéticos y al uso de residuos forestales y en general el uso de todo tipo de residuos celulósicos.

En Alemania, se espera que los pellets participen en el 8% del mercado de los sistemas de calentamiento, y tendría un gasto estimado de combustible de 1.35 billones de Euros/año. De los países americanos, los Estados Unidos y Canadá poseen una industria de pellets que se utilizan a nivel doméstico y para el mercado de exportación. Los precios de pellets en Estados Unidos se encuentran entre 120 y 200 dólares por tonelada (Peksa-Blanchard, 2007). China se ha apropiado de la tecnología, produce toda la maquinaria necesaria localmente, ha logrado que los costos de producción sean más bajos que los de importación y que el precio de la electricidad generada compita con el obtenido a partir de carbones de bajo rango locales y tiene un programa ambicioso, que aspira a alcanzar el 10% del total del consumo de su energía a partir de biomasa para el año 2020. En América del Sur Brasil, Argentina y Chile, tienen una capacidad pequeña de producción de pellets, con lo cual satisfacen necesidades internas, pero no tiene capacidad de exportación (European Commission, 2013).

## BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y SU RELACIÓN CON LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

Los biocombustibles obtenidos de cultivos energéticos como el etanol de la caña y biodiesel de la palma no sólo ayudan a mitigar los Gases de Efecto Invernadero (GEI) sino que también son importantes para reducir las emisiones nocivas del aire como monóxido de carbono y material particulado proveniente de la mala combustión de la gasolina y el diésel, con lo cual también se presentan beneficios en la salud de los habitantes urbanos.

La producción de los biocombustibles líquidos de origen agrícola como los mencionados anteriormente generan residuos sólidos, bagazo de la caña de azúcar y desechos del fruto de palma, con los cuales se produce por método modernos de cogeneración, electricidad para la red central y calor residual para la obtención de biocombustible en las plantas de transformación, con rendimientos superiores al 60% frente al 30% de la plantas de generación térmica a partir de carbón; estos procesos constituyen la vía más eficaz para aumentar la competitividad de los biocombustibles y la descarbonización global. Hay un detalle importante en estos procesos, en el caso del bagazo de la caña, su producción es estacional y si las empresas azucareras quisieran como negocio alternativo la cogeneración de electricidad durante todo el año, entonces puede recurrir a la biomasa forestal, normalmente en forma de astillas. En la Figura 14 se muestra el proceso de generación de electricidad en una industria azucarera en Costa Rica.



**FIGURA 14: GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN UNA INDUSTRIA AZUCARERA CON EL NEGOCIO ADICIONAL DE VENTA DE ELECTRICIDAD Y LA NECESIDAD DE COMPLEMENTAR EL BAGAZO DE LA CAÑA CON LA BIOMASA FORESTAL. CASO INGENIO TABOGA EN COSTA RICA.**



## BIOENERGÍA EN LAS AMÉRICAS

Estimar el potencial energético de la biomasa en América es importante para su aprovechamiento, así como las posibilidades en el uso de tecnologías, el cual dependerá de su composición química y el tipo de biomasa para determinar sus usos. En los (Cuadros 4 y 5) se muestra la producción de bioenergía en el año 2011 y el potencial de bioenergía para cada uno de los países de las Américas.

El Cuadro 4 muestra que los países que más producen bioenergía son Estados Unidos, Brasil y Canadá respectivamente, en todos los casos la principal fuente energética se trata de sólidos primarios (madera, pellets, briquetas, carbón, etc) y biocombustibles líquidos primarios, lo que demuestra que los biocombustibles de segunda generación aun no representan una fuente importante en el coctel energético, sin embargo según las estadísticas presentadas por la IEA, en los últimos años se ha observado un crecimiento en la producción de energías a partir de los distintos tipos de residuos de biomasa (biocombustibles secundarios), esto por la necesidad de disminuir la contaminación dada la alta producción de residuos y la emisión de exceso de gases de efecto invernadero debido al uso de combustibles fósiles, el objetivo de la investigación en este campo es el desarrollo de procesos industriales económicos que puedan tratar todos los distintos tipos de residuos para darles un valor agregado, y detener la contaminación que pone en riesgo distintos ecosistemas y nuestra propia existencia.

En el Cuadro 5, se observa que el mayor potencial energético con residuos de biomasa se encuentra en Brasil, seguido de EEUU y Colombia, en esta tabla no se tuvo en cuenta todos los tipos de cultivos, por este motivo estas estadísticas pueden variar, ya que solo se tuvo en cuenta los cultivos de los que se conoce el factor residual, con esta aclaración se encuentra que el potencial energético de los residuos de biomasa en las Américas corresponde a 43,0 EJ, asumiendo un factor de 4 para cultivos energéticos, el potencial estimado de bioenergía puede estar alrededor de 166 EJ.

**CUADRO 5: POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS PRINCIPALES CULTIVOS EN LAS AMÉRICAS.**

País/Potencial Energético (TJ)	Caña Azúcar	Jatrofa	Palma De Aceite	Caña Panela	Café	Maíz	Arroz	Banano	Plátano
Argentina	-	-	-	-	-	340676	-	-	-
Bolivia	3047	-	-	-	523	15768	626	54130	1179
Brasil	32425536	-	-	-	138578	852029	151902	24950	-
Colombia	1066058	-	20222	56054	33491	9144	27836	1022	9888
Cuba	382	-	-	-	-	5556	907	5707	1796
Ecuador	225332	-	45324	-	1815	12596	12793	28929	1904
Guatemala	91572	-	6997	-	2769	15324	334	9413	663
México	338	57	121	-	-	-	-	-	-
Nicaragua	357879	-	1310	-	4598	8661	-	169	421
Venezuela	368811	-	8090	-	3937	32065	9550	-	1071
EE.UU.	1325054	-	-	-	-	1651808	2089552	-	-
Canadá	-	-	-	-	-	181479	-	-	-

**CUADRO 4: RESUMEN DE PRODUCCIÓN DE BIOENERGÍA EN LAS AMÉRICAS.**

PAÍS	SÓLIDOS			GASES	LÍQUIDOS(MILES DE BARRILES DÍA)		
	RSU (TJ)	RI(TJ) Residuos Industriales	S. Primarios (TJ)	Biogás (TJ)	Total bio-Combustibles líquidos	Bioetanol	Biodiesel
Argentina	0.00	0.00	92648.00	0.00	50.34	3.00	47.34
Bolivia	0.00	0.00	7474692.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Brasil	0.00	0.00	2711814.00	1644.00	438.06	392.00	46.05
Canadá	5229.00	4914.00	426237.00	9921.00	32.70	30.00	2.70
Chile	0.00	85.00	204913.00	362.00	0.00	0.00	0.00
Colombia	0.00	0.00	151279.00	0.00	15.00	6.00	9.00
Costa Rica	0.00	0.00	30741.00	4.00	0.40	0.40	0.00
Ecuador	0.00	0.00	29371.00	0.00	0.10	0.10	0.00
España	14612.00	0.00	201458.00	12040.00	20.00	8.00	12.00
Guatemala	0.00	0.00	274756.00	0.00	4.01	4.00	0.01
Honduras	0.00	0.00	86645.00	0.00	0.02	0.00	0.02
México	0.00	0.00	344075.00	2154.00	0.40	0.30	0.10
Nicaragua	0.00	0.00	51850.00	0.00	0.20	0.20	0.00
Panamá	0.00	0.00	19493.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Paraguay	0.00	0.00	97208.00	0.00	2.22	2.20	0.02
Perú	0.00	0.00	123420.00	0.00	2.70	2.10	0.60
Uruguay	0.00	0.00	53399.00	0.00	0.40	0.20	0.20
USA	296096.00	140155.00	2075523.00	230446.00	971.73	908.62	63.11
Venezuela	0.00	0.00	27918.00	0.00	0.00	0.00	0.00

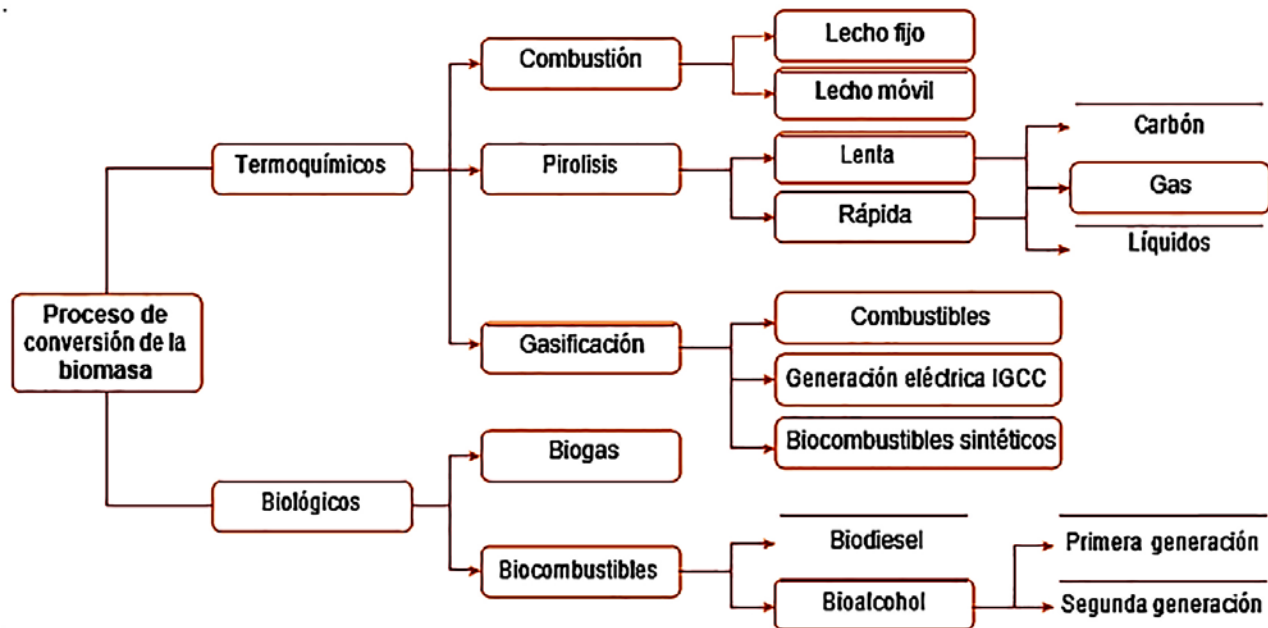
# PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA

---

El principal problema que tiene el uso de la biomasa “in natura” como energético, bien sea en la generación eléctrica o como combustible directamente, es su baja densidad energética (que corresponde aproximadamente la mitad de la del poder calorífico de carbón térmico), en segundo lugar está la alta capacidad de retención de humedad, y finalmente la degradación biológica; por esto su transporte a largas distancias no es rentable y en consecuencia debe ser utilizada en las cercanías del sitio de generación, lo cual determina el tamaño de planta o escala de utilización.

El tamaño de planta, a su vez, es factor determinante en la eficiencia y ahorro económico durante la operación. La producción de pellets y la torrefacción de biomasa buscan en consecuencia, incrementar la densidad energética para aumentar el radio de transporte económico de los pellets e inclusive llevarlo a mercados internacionales como sucede actualmente con el carbón mineral.

En los procesos industriales hay exigencias comunes para lograr mayor eficiencia como tener tamaños físicos manejables de la materia prima y un alto poder calorífico por volumen (alta densidad energética). Para el caso de residuos de cosechas agrícolas como el tallo y la espiga de arroz, gramíneas, pastos, ramas de árboles y/o cualquier otra biomasa de baja densidad, la biomasa se somete a un pre-secado, seguido de reducción de tamaño y aglomeración a las altas presiones para la formación de pellets o briquetas con mejores propiedades. En la Figura 15, se presenta un esquema general de los diferentes procesos utilizados en la conversión, en ella se muestran dos grandes bloques: procesos termoquímicos y los biológicos.



Fuente: Rincón J.M., Gastón R., Islas J.M., Lizarde J.E., 2014

FIGURA 15: PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA A ENERGÍA.

## PROCESOS TERMOQUÍMICOS

Los procesos termoquímicos se clasifican como combustión directa, gasificación y pirolisis. Estos se describen a continuación.

### COMBUSTIÓN

De todas las tecnologías de conversión de biomasa, la combustión es la de mayor aplicación y se encuentra en desarrollo permanente (Loo, 2014). Existe una alta oferta comercial de plantas de combustión y hay diversas opciones de integración para plantas de pequeña y gran escala. A fin de mantener su competitividad frente a otros procesos como los de gasificación y pirolisis, la tecnología de combustión se ha venido implementando constantemente (Bauen, 2009). Por razones económicas y ambientales, la co-combustión de carbón y biomasa (cofiring) es una de las opciones que ha recibido mayor interés en el mundo recientemente.

La eficiencia de transformación de biomasa a energía eléctrica en plantas térmicas que utilizan el ciclo de vapor, es cerca al 25%, y puede pasar al 30% en la co-combustión con carbón o al 60%-80% en térmicas que realizan cogeneración. Este incremento en la eficiencia, es una de las oportunidades para cambiar de tecnologías a nivel mundial y disminuir la presión del efecto invernadero. Se espera que con la combinación de estas alternativas, junto con el almacenamiento del bióxido de carbono producido en las plantas de gasificación integrada en ciclo combinado o GICC que es un sistema de producción de energía eléctrica que utiliza gas de síntesis para impulsar una turbina de gas, cuyo calor residual se aprovecha en una turbina de vapor mediante un ciclo combinado (Figura 16). Este proceso permite disminuir la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera (NETL, 2008).

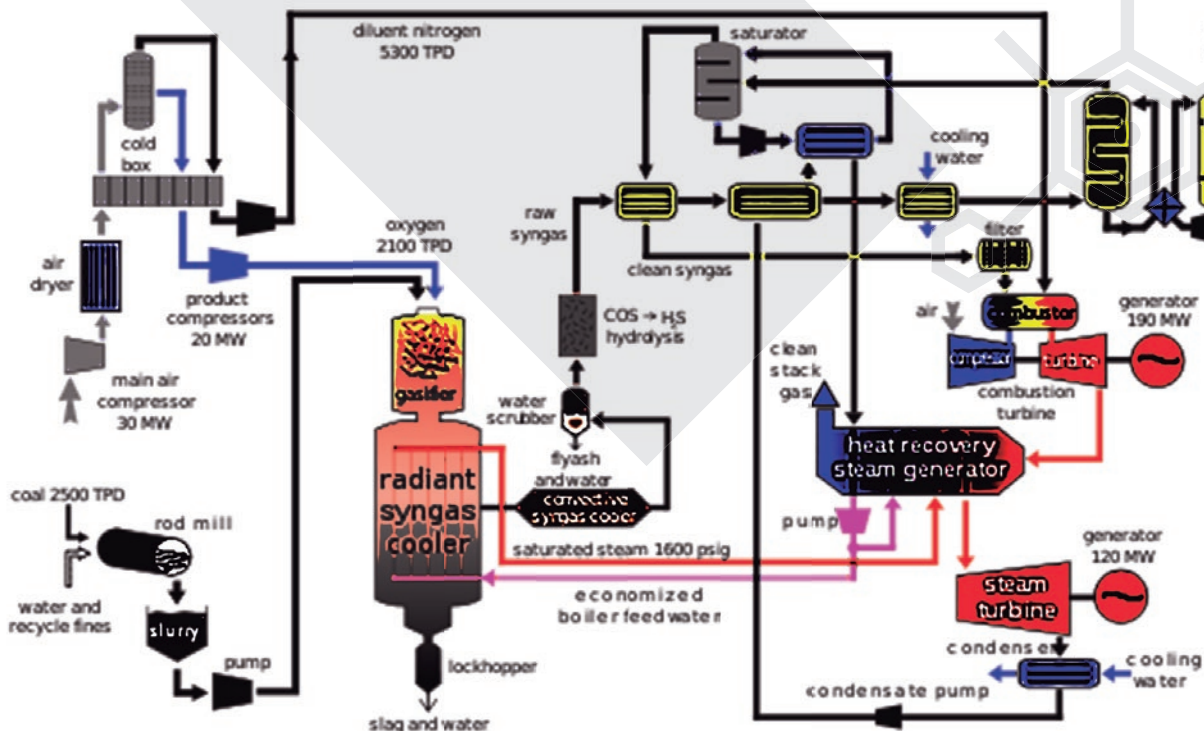


FIGURA 16: EJEMPLO DE UNA CENTRAL DE GASIFICACIÓN INTEGRADA EN CICLO COMBINADO.

Dada la ventaja ambiental que presenta la utilización de biomasa, es necesario establecer estrategias que permitan su uso en la generación eléctrica sin que esto afecte demasiado los costos comparativos con otras fuentes de energía. Las estrategias más utilizadas son:

- Co-combustión carbón/biomasa (Cofiring).
- Construir plantas en zonas donde se requiera baja capacidad de generación.
- Aumentar la eficiencia utilizando el calor residual del vapor, cogeneración, (Combined Heat and Power, CHP), ejemplo de estos son los ingenios azucareros en Colombia y Brasil, en los cuales el exceso de energía se envía a la red, y la energía térmica se utiliza para los procesos de producción de azúcar de la planta; con lo que es posible tener eficiencias mayores al 60%.

Los costos de la biomasa como combustible es el parámetro más importante en la simulación de los costos de generación de cualquier tecnología basada en la generación con biomasa, los cuales dependen de muchos parámetros, incluyendo la localización del proyecto, el tipo de biomasa utilizada como materia prima, la cantidad requerida, poder calorífico, entre otros (Rincón J. & Guevara P., 2013).

Como la biomasa residual proveniente de cultivos industriales tiene un valor comercial muy bajo y en algunos casos su almacenamiento puede causar problemas ambientales o logísticos, se utilizan estos residuos en la generación de electricidad la cual, como se explicó anteriormente, se genera para uso de la planta y el exceso va a la red eléctrica, como es el caso de la generación de energía eléctrica a partir de residuos de caña de azúcar, palma y arroz, las cuales están en operación en la mayoría de los países que cuentan con este tipo de cultivos, este aprovechamiento de la biomasa no compite ni con el uso del suelo, ni con la oferta alimentaria y debe ser por lo tanto motivo de evaluación en la mayoría de los países de las Américas.

## CALDERAS

Una caldera de biomasa es un intercambiador de calor que emplea como fuente de calor y energía materia orgánica por medio de su combustión. En países como Francia y España son ampliamente usadas como un medio de calefacción doméstica y para la producción de vapor en procesos industriales (Figura 17).

En la combustión de biomasa se libera  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, el mismo  $\text{CO}_2$  que absorbió de la atmósfera durante su crecimiento, si se trata de materia orgánica vegetal, o que absorbieron las plantas que ingirió, si se trata de materia orgánica animal.

**Un sistema de combustión de biomasa cuenta con los siguientes subsistemas:**

- Una estructura para almacenamiento del combustible.
- Un medio de transporte y alimentación del combustible desde el punto de almacenamiento hasta el punto de combustión.
- Una cámara de combustión y equipos adyacentes.
- Una caldera para producción de vapor o agua caliente, según la aplicación.
- Recuperadores de calor (Economizadores).
- Un sistema de filtros de gases de combustión, para precipitación de ceniza.
- Un punto para extracción de ceniza.

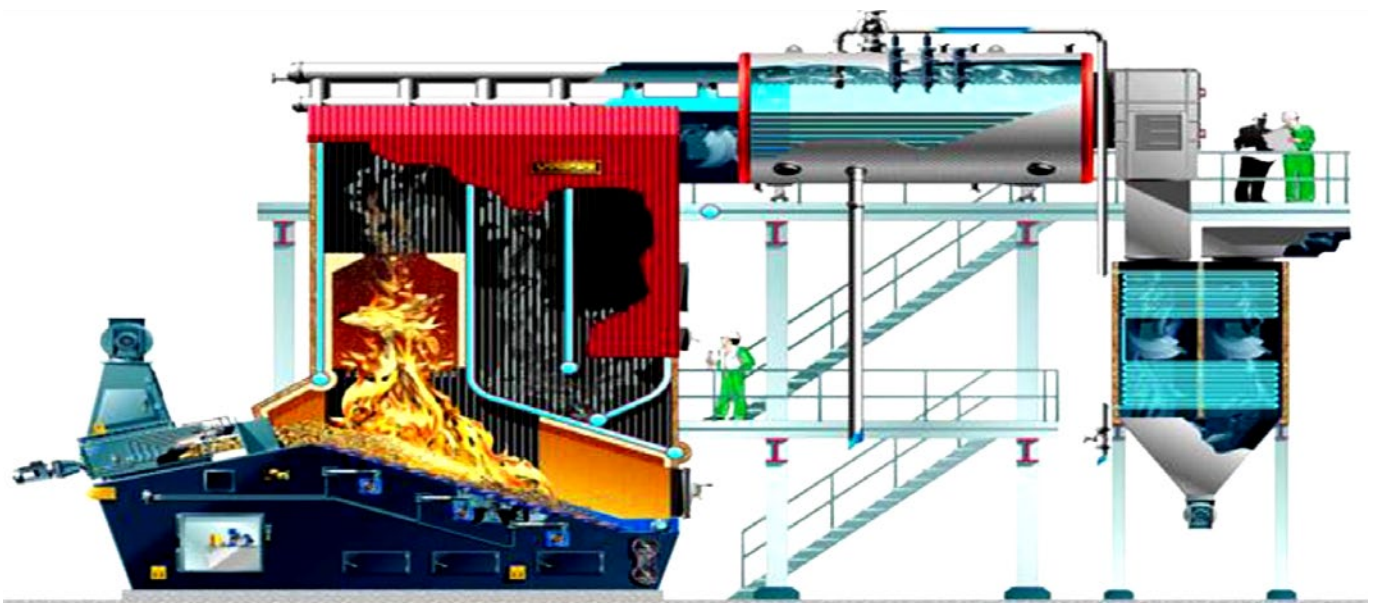


FIGURA 17: EJEMPLO DE UNA CALDERA DE BIOMASA.



## TIPOS DE CALDERAS DE BIOMASA

Las calderas de biomasa se pueden clasificar en dos categorías, según el combustible que utilizan y según la tecnología que poseen.

### Según el tipo de combustible se clasifican en tres grupos:

- **Calderas multicomcombustible:** Admiten varios tipos de combustible y poseen la capacidad de realizar cambios rápidos entre ellos, por ejemplo astillas y pellets, tu tamaño puede ser mediano desde 200 KW o mayores.
- **Calderas de biomasa:** Este tipo de calderas puede trabajar con distintos tipos de biomasa pero no puede realizar cambios rápidos, para esto debe vaciarse el contenedor del combustible y llenarlo con el nuevo con un tiempo considerable de antelación.
- **Calderas de pellet:** Poseen tamaños variables desde los 40 KW hasta los 6,000 KW y mayores, destacan por ser muy eficientes y de tamaños compactos.

### En relación a su tecnología las calderas biomásicas se dividen en cuatro grupos:

- **Calderas de pellets de condensación:** Estas calderas son generalmente pequeñas y automáticas, tienen la característica de poder recuperar el calor latente de condensación contenido en el combustible mediante una disminución gradual de la temperatura de los gases de combustión, hasta que el vapor de agua contenido en los mismos se condensa en el intercambiador de calor. Esta tecnología permite ahorrar un 15 % de combustible respecto de una caldera de combustión tradicional.
- **Calderas adaptadas para biomasa:** Suelen ser calderas de carbón, diesel o bunker a las cuales se les ha adaptado un quemador de pellet para el uso de biomasa, tienen la desventaja de que su eficiencia cae hasta valores situados entre un 75 - 85 %, generalmente son semiautomáticas ya que al no haber sido diseñadas exclusivamente para biomasa carecen de los medios apropiados para limpieza y mantenimiento.
- **Calderas mixtas:** Son capaces de utilizar dos tipos de combustibles, pudiendo realizar un cambio del mismo en caso de ser necesario, por ejemplo debido a problemas de suministro de uno de los combustibles, no obstante precisan de un sistema de almacenamiento y alimentación para cada uno de los combustibles.
- **Calderas eficientes de biomasa:** Se diseñan para trabajar con un tipo de biomasa específica alcanzando rendimientos de hasta un 92 %, aunque es posible su uso con otro tipo de combustible su eficiencia disminuye considerablemente.

## EFICIENCIA DE UNA CALDERA

La mayoría de procesos productivos actuales emplean maquinas térmicas como hornos y calderas para obtener energía, por lo que obtener los mejores índices de eficiencia en estos equipos puede conducir a ahorros energéticos y monetarios considerables. La eficiencia de una caldera hace referencia a la relación entre la energía en forma de calor absorbido por el agua y la energía liberada, la diferencia entre estos dos valores corresponde a las pérdidas de calor de la caldera.

Muchas veces la eficiencia de estos aparatos es subestimada ya que lograr incrementos grandes de rendimiento es muy difícil, pero debido a que estos equipos trabajan prácticamente todo el año, sus consumos de combustible son muy altos y aumentos pequeños de uno o dos puntos de eficiencia representan ahorros considerables.

El método para calcular la eficiencia de una caldera se da por la relación existente entre la entalpia del vapor de salida y el agua de entrada, el flujo másico del combustible, poder calorífico del combustible y la producción de vapor de la caldera, mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\text{Prod. Vapor [Ton/h]} * (\text{Entalpia vapor} - \text{Entalpia agua de entrada}) [\text{KJ} / \text{Kg}]}{[(\text{Poder calorífico del bunker}) [\text{KJ} / \text{Kg}] * \text{Consumo de bunker} [\text{Kg} / \text{h}]]} * 100,000$$

## **SOBRE LA ESCALA DE LOS PROYECTOS DE COMBUSTIÓN BASADOS EN LA BIOMASA.**

Según la aplicación deseada de la combustión y la magnitud en el aprovechamiento energético (potencia del sistema de generación de energía), se distinguen diversas escalas por las que la tecnología diverge en configuración y magnitud. Para el análisis de la tecnología de la combustión se han distinguido tres escalas según la potencia instalada:

### **PEQUEÑA ESCALA (5-500 KW):**

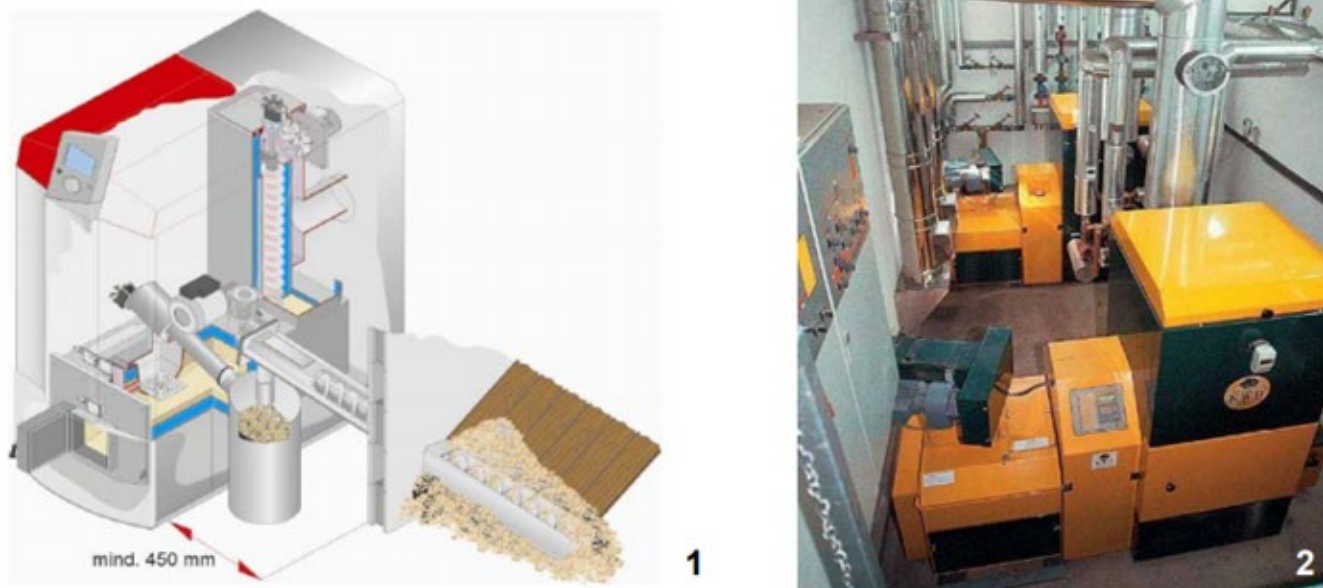
Incluye desde hogares domésticos hasta calderas para el suministro de agua caliente o calor a escala residencial y comunitaria. Se caracterizan por:

- Producción de energía térmica en estufas y hogares a partir de la combustión de biomasa en una parrilla fija plana, con propagación del calor desde la fuente generadora mediante aire.
- Incorporación de intercambiadores de calor (sistema caldera) en los sistemas de más elevadas potencia ( $\geq 15\text{kW}$ ) para la producción de agua caliente con fines de calefacción residencial y consumo sanitario.
- Control de la entrada de aire mediante respiraderos o rendijas en los sistemas de menor potencia. Para mayores potencias, el control es automático.
- Eliminación de las cenizas manual, excepto en los sistemas que incorporan una entrada automática de combustible (pellets y astillas) donde la ceniza es arrastrada y recogida en un cenicero.
- Instalación de silos o cámaras de almacenado de combustible en calderas domésticas de elevada potencia con la finalidad de garantizar una operación continua a lo largo de días o semanas. El combustible de biomasa es transportado desde el silo hasta la caldera mediante un transportador sin fin (pellets y astillas).



- Las tecnologías de combustión de pequeña escala no incorporan sistemas de limpieza de gases. Solamente son instalados tubos de evacuación de humos con acceso al exterior del recinto donde es instalado el sistema de combustión.

La Figura 18 ilustra las calderas de biomasa utilizadas para la calefacción de edificios y el Cuadro 6 muestra las principales características.



**FIGURA 18: CALDERAS DE BIOMASA PARA CALEFACCIÓN DE EDIFICIOS (1) CALDERA DE 14,9 KW, (2) CALDERA <500KW.**

**CUADRO 6: CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE COMBUSTIÓN DE PEQUEÑA ESCALA.**

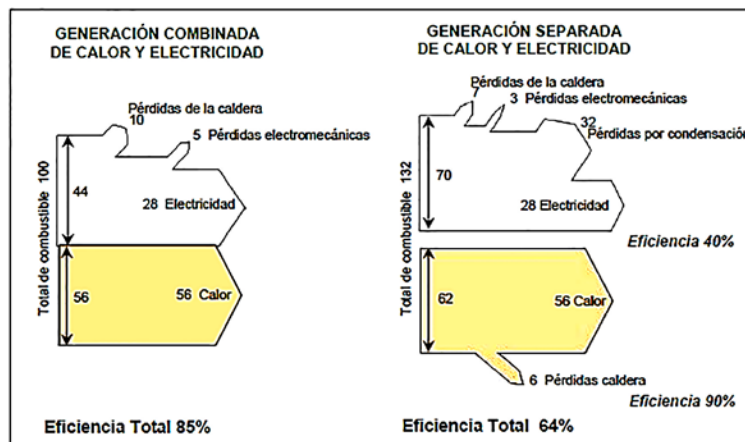
Tipología de horno	Potencia	Tipo de energía	Entrada combustible	Retirada de ceniza
Hornos de palos y briquetas				
Hogares	3 – 5 kW	Aire caliente	Manual	Manual
Estufas	3 – 8 kW	Aire caliente	Manual	Manual
Estufas de cerámica	8 kW	Aire caliente	Manual	Manual
Calderas	15 kW	Agua caliente	Manual	Automática
Hornos para astillas	15 – 500 kW	Aire/agua caliente	Automática	Automática
Hornos para pelets	15 – 500 kW	Aire/agua caliente	Automática	Automática
Hornos para palos y pelets	15 – 500 kW	Aire/agua caliente	Manual/automática	Automática

## MEDIANA ESCALA (500 KW A 5 MW):

Incluye calderas para el suministro residencial, de edificios y/o pequeños distritos, dependiendo de la potencia instalada. La energía producida es térmica y/o eléctrica, según el equipo instalado. Para potencias superiores a 1MW, se suelen instalar turbinas de gas o vapor para la generación de electricidad. El suministro de biomasa de origen forestal implica un alcance regional. Se caracteriza por lo siguiente:

- Consumo de astillas de madera en la totalidad de experiencias debido a su menor coste en relación a los pellets.
- Operación del hogar a partir de una parrilla fija plana, inclinada o escalonada, con aportación de la biomasa mediante un transportador sinfín tanto por la parte superior, como inferior u horizontal respecto a la parrilla.
- Producción de energía térmica en las experiencias de menor potencia para la calefacción de edificios. También se instalan sistemas de cogeneración. Las eficiencias de conversión energética son variables en función de la tecnología instalada.
- Instalación necesaria de silos, tanques o cámaras de almacenado que aporten combustible continuamente a la caldera. Las dimensiones de éstos varían en función de la potencia y eficiencia de conversión del sistema instalado.
- Instalación de ciclones o pequeños multiciclones para la eliminación de partículas de los gases de combustión. A medida que aumenta la potencia instalada, se requieren sistemas de separación de partículas más eficientes y de mayor magnitud debido al elevado volumen de gas de combustión generado. En estos casos, se instalan sistemas combinados como ciclones o multiciclones juntamente con filtros de mangas o precipitadores electrostáticos.
- En algunas experiencias europeas son presentes sistemas de quema de “pacas” de paja o “Cigar burning” para potencias de 1 - 2 MWth.

La Figura 19 muestra los diversos tipos de hogares utilizados en la combustión de mediana escala. La Figura 20 identifica las pérdidas energéticas en la generación de electricidad y calor, a partir de un horno de parrilla con astillas de madera.



**FIGURA 20: BALANCE DE ENERGÍA EN LA GENERACIÓN TÉRMICA/ELÉCTRICA A PARTIR DE LA COMBUSTIÓN DE BIOMASA.**

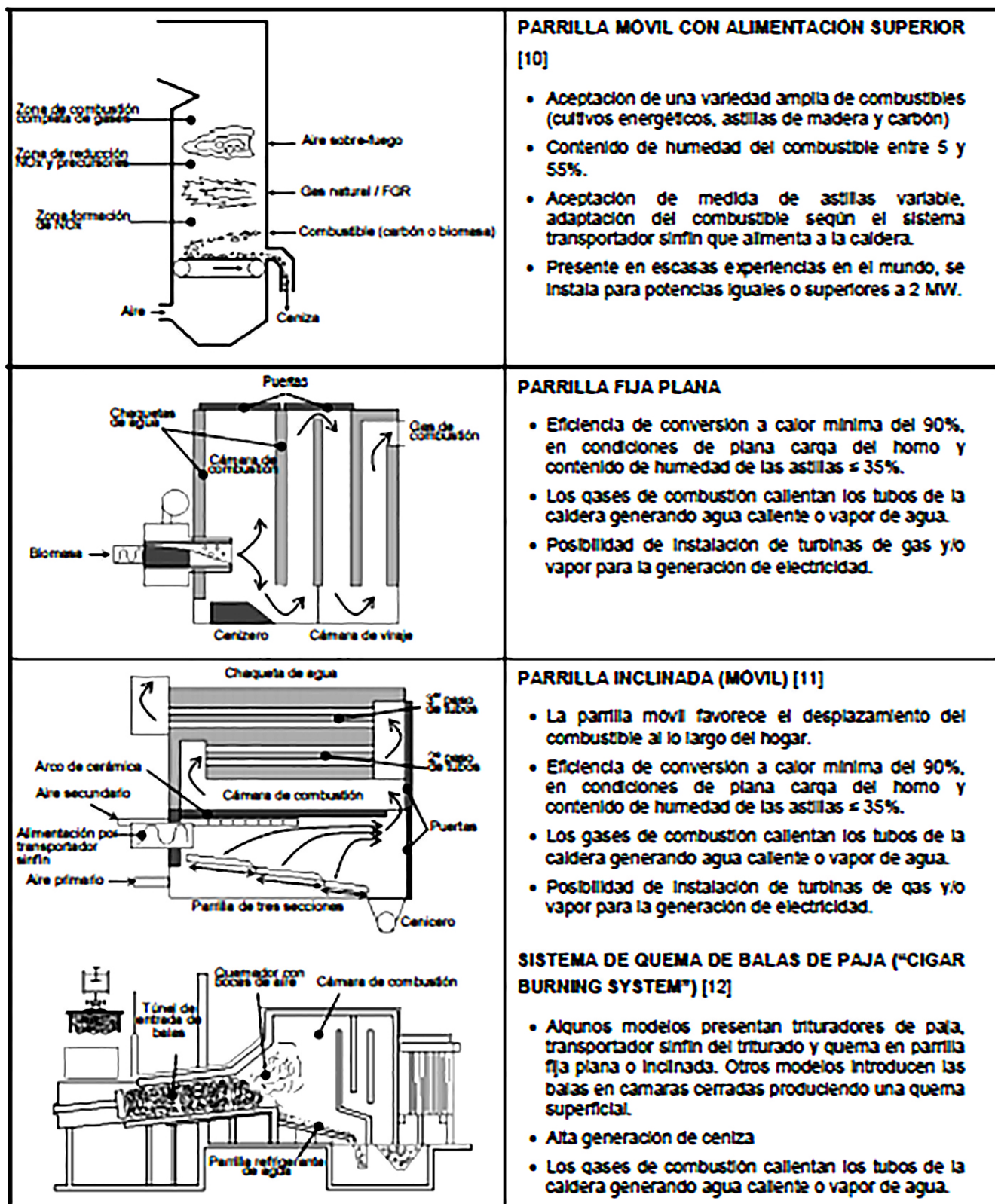


FIGURA 19: TIPOS DE HOGARES Y QUEMADORES DE PARRILLA EN LOS SISTEMAS DE COMBUSTIÓN DE MEDIANA ESCALA.

## GRAN ESCALA (> 5MW):

Son plantas orientadas a la generación de energía eléctrica, que pueden suministrar energía térmica cubriendo la demanda calorífica del territorio (hoteles, restaurantes, polígonos industriales). Se caracterizan por:

- Similitud en características a los sistemas de mediana escala. Aumento de dimensiones y complejidad técnica de los componentes, necesidad de combustible de biomasa y volumen de gases y cenizas generados.
- Generación energía térmica y eléctrica combinadamente mediante turbinas de vapor (eficiencia media 85-88%), o solamente eléctrica cuando mayor es la potencia instalada (eficiencia media 25-30%)
- Combustión compatible de diversos combustibles de biomasa en un mismo horno (astillas de madera, residuos vegetales, etc.) La limitación en la operación de la caldera se haya en el contenido de humedad global del combustible o combustibles consumidos en el horno.
- Requerimiento de sistemas de limpieza de gases con elevados rendimientos de la separación de partículas. Se suelen usar sistemas combinados de filtros (multiciclón + precipitador electrostático, filtro de mangas + precipitador).

## GASIFICACIÓN

La gasificación de combustibles sólidos como la biomasa y/o carbón mineral, no es un proceso nuevo y ha sido utilizado a escala comercial por más de 150 años (Zhou, H., Jing, B., Zhong, Z., & Hiao, R., 2005). El desarrollo de los gasificadores aún continúa y es motivo de avances como la gasificación a presión para la producción de energía eléctrica en ciclo combinado (IGCC), con eficiencias globales hasta del 50%, con lo cual es posible ahorrar combustible fósil y por lo tanto proteger el ambiente en lo que respecta al efecto invernadero causado por las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los productos de gasificación se pueden clasificar como gas de bajo, medio y alto poder calorífico, como se muestra en el Cuadro 7.

**CUADRO 7: PRODUCTOS Y CARACTERÍSTICAS DE LA GASIFICACIÓN.**

Producto	Características
Gas de bajo BTU (150-300BTU/ pie3)	Elaborado con aire. Contiene cerca al 50% de nitrógeno, mezcla de H <sub>2</sub> , CO y traza de otros gases como metano (CH <sub>4</sub> )
Gas de síntesis o Gas de medio BTU (300-500BTU/pie3)	Elaborado con oxígeno. En su composición es predominantemente H <sub>2</sub> y CO con algo de metano (CH <sub>4</sub> ) y gases no combustibles
Gas de alto BTU (980-1080 BTU/pie3)	Elaborado a partir del gas de síntesis. Casi todo metano
Óxidos de azufre (SOX)	GEI, origina lluvia ácida, afecta crecimiento de vegetación

Fuente: Rincón J., Capítulo 7: Biomasa, 2010.

El gas de bajo poder calorífico es importante como combustible o como materia prima para la producción de amoníaco y metanol. El gas de medio poder calorífico, llamado también gas de síntesis, tiene una composición química similar a la de bajo poder calorífico pero sin nitrógeno; es considerablemente más versátil que el de bajo poder calorífico y se puede usar como gas para turbinas a gas y turbinas de ciclo combinado; se usa también como gas de síntesis para la obtención de metano, metanol, fertilizantes, hidrocarburos (biogasolina y biodiesel) mediante las reacciones del proceso Fisher-Tropsch (F-T), y la producción de otra gran variedad de productos químicos. Para su obtención, se reemplaza el aire por oxígeno puro en el reactor con lo cual se evita la presencia de hasta un 80 % de nitrógeno. El gas de alto poder calorífico es esencialmente metano llamado también sustituto de gas natural (SNG) y su obtención se realiza a partir del gas de síntesis mediante un ajuste estequiométrico a  $3H_2/CO$  y utilizando níquel como catalizador.

En el Cuadro 8 se muestran a manera de ejemplo los costos de capital asociados con el gasificador de biomasa, se presentan dos tamaños representativos de 100 kW para mini redes y 20 MW para las aplicaciones conectadas a la red. Estos costos van variando a medida que se avanza en el desarrollo tecnológico.

**CUADRO 8: COSTOS DE CAPITAL (US\$/KW) PARA EL SISTEMA DE GENERACIÓN POR GASIFICACIÓN.**

Capacidad	100 kW	20 MW
Costo de equipos	2,781	1,943
Costos civiles	134	123
Ingeniería	78	45
Costo montaje	78	67
Costos de Contingencia	145	111
TOTAL	3.216	2.289

Fuente: Rincón J. , 2010.

Tanto la gasolina como el diesel se pueden obtener a partir de gas de síntesis, por vía de la gasificación de residuos sólidos orgánicos y posterior reacción por métodos convencionales como los utilizados en la planta de SASOL (gas de síntesis proveniente de carbón) en Sud África. Esta tecnología de síntesis, es bien conocida y en la actualidad hay plantas piloto en Alemania, Japón, China y Estados Unidos. El proceso de conversión de biomasa a gasolina y diésel se conoce como BTL por sus siglas en Inglés y una vez obtenido el gas de síntesis, el siguiente paso es la reacción de condensación de Fischer-Tropsch (Reacción F:T) cuyos principios son los mismos utilizados en la producción de combustibles líquidos a partir de carbón, el problema en este caso es el tamaño de los reactores los cuales son más pequeños que los utilizados comercialmente con carbón, en la actualidad varios grupos de investigación buscan disminuir los costos debidos a la economía de escala.

En Estados Unidos existen plantas piloto de BTL, en Colorado que suministran combustibles de aviación a la fuerza aérea de Estados Unidos, por su parte en Canadá recientemente se ha construido una planta de producción de metanol a partir de gasificación de residuos sólidos urbanos (Enerkem, 2014).

## CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE LAS MADERAS

El estudio de la velocidad del frente de llama bajo gasificación en lecho fijo equicorriente se ha convertido en uno de los métodos experimentales más económicos y efectivos para el diseño de gasificadores a escala piloto e industrial, ya que permite estudiar el proceso de gasificación o combustión en lecho fijo de diferentes combustibles sólidos. Esta metodología posibilita evaluar el efecto de distintos factores controlables en el proceso termoquímico, como el tipo de biomasa y su contenido de humedad, el flujo de aire y la geometría del reactor, entre otros, con el fin de establecer los parámetros de diseño adecuados para las dimensiones globales de los gasificadores (Pérez *et al.*). En la literatura consultada se presentan varios estudios, cuyo objetivo principal es caracterizar el proceso de gasificación mediante investigaciones experimentales en plantas piloto y a escala de laboratorio. Varios autores se ocupan del efecto de las variables de entrada en los principales parámetros de salida, como la composición, el poder calorífico del gas y la eficiencia del proceso. Una forma de caracterizar el proceso de gasificación a escala de laboratorio es mediante un lecho fijo equicorriente invertido a escala (Figura 21). El reactor consta de un tubo de acero inoxidable, aislado con una capa de lana de roca; tiene un diámetro interno de 100 mm y una longitud de lecho de 500 mm.

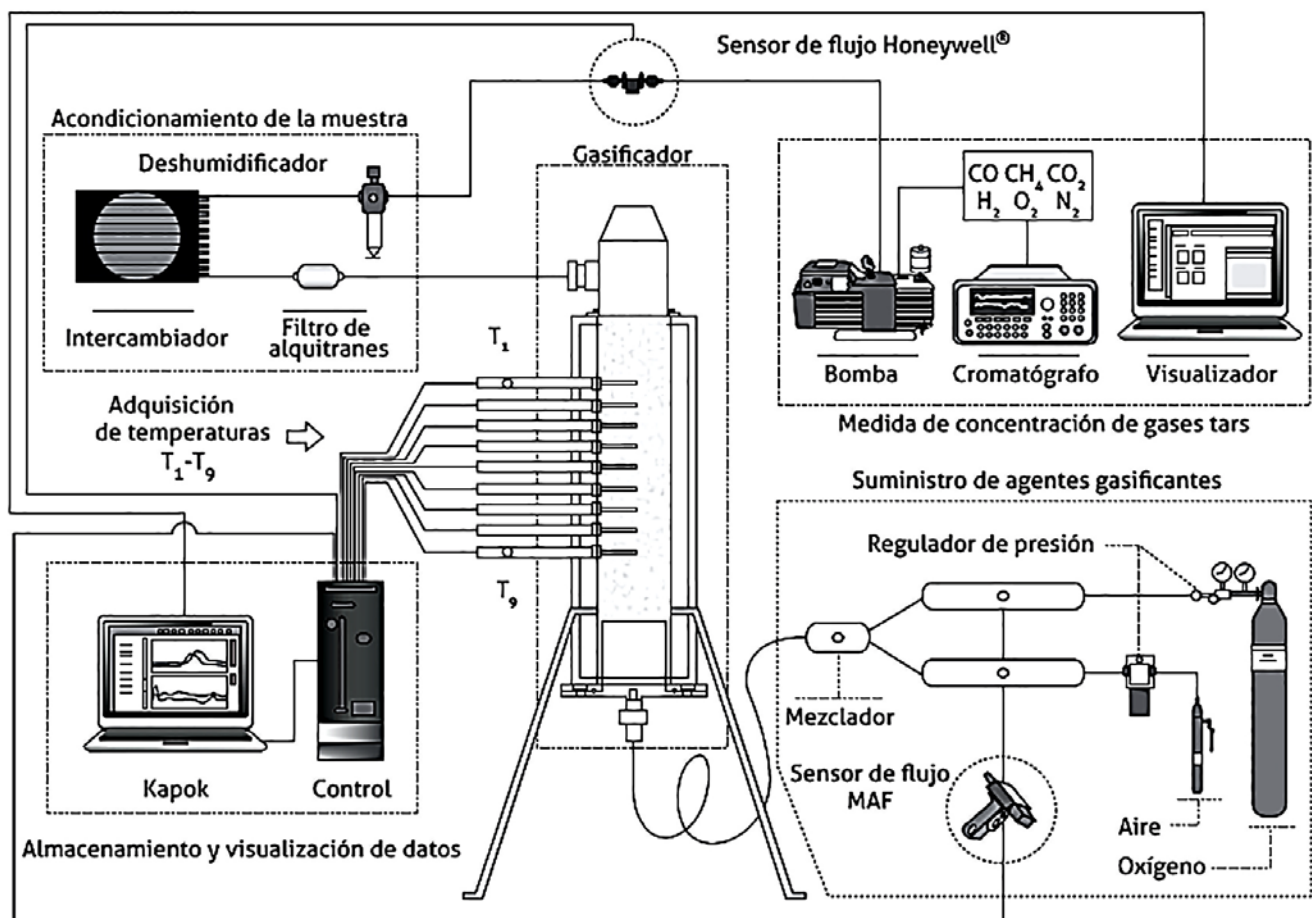


FIGURA 21: DISEÑO BÁSICO DE UN SISTEMA DE LECHO FIJO EQUICORRIENTE A ESCALA DE LABORATORIO.

El flujo de aire es controlado y medido mediante un medidor de flujo (tipo Venturi) Honeywell® AWM5104VN, que se encuentra acoplado a la línea de aire comprimido del laboratorio. Este medidor asegura una cantidad específica de aire, lo que permite lograr alta receptibilidad de las pruebas experimentales. El acondicionamiento del gas de gasificación (remoción de alquitranes y filtrado) posibilita medir la concentración de sus componentes ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2$  y  $CH_4$ ) por medio de un cromatógrafo de gases. En este tipo de reactores se comienza ingresando la biomasa y encendiéndola en la parte superior. Simultáneamente, el aire es suministrado por la parte inferior. El frente de llama empieza a descender hasta alcanzar la parte inferior del gasificador. Las fases del proceso se organizan según la configuración downdraft). En el transcurso del experimento (mientras el frente de llama desciende por el gasificador), el perfil de temperatura en el reactor se mide a través de nueve termopares tipo K, instalados con una separación de 30 mm entre sí a lo largo del lecho, y se introducen hasta el centro del gasificador. Para evitar la formación de caminos preferentes, los termopares se retiran durante el proceso de llenado y se van introduciendo gradualmente mientras se llena el gasificador. Este procedimiento se repite durante todas las pruebas. Un campo típico de temperaturas y de flujo de aire de la instalación experimental durante las pruebas de gasificación se muestra en la Figura 22.

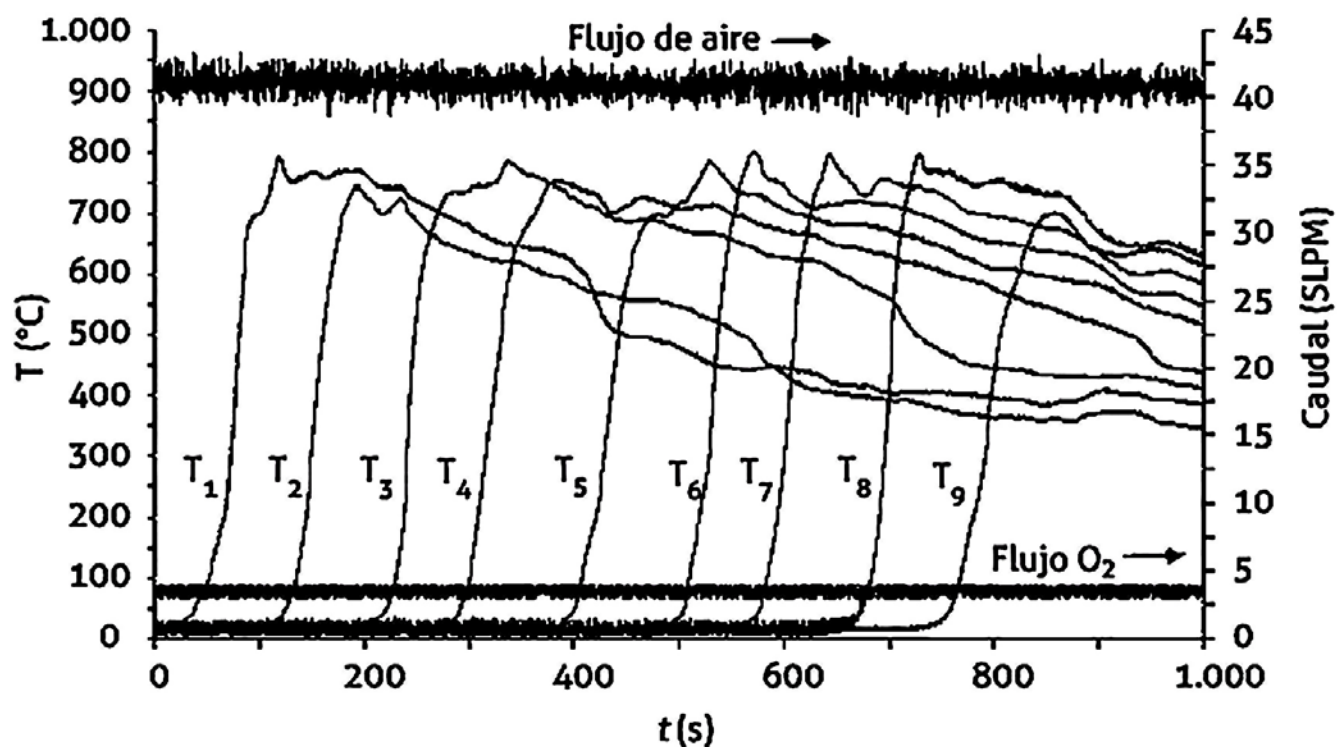


FIGURA 22: CAMPO DE TEMPERATURA Y DE CAUDAL DE FLUJO DE AIRE DURANTE UN EXPERIMENTO.

## CÁLCULO DE PARÁMETROS EXPERIMENTALES

Los experimentos en lecho fijo equicorriente permiten calcular parámetros considerados como herramientas empíricas de gran utilidad para el diseño escalado de reactores. Entre esos parámetros están el dosado relativo de gasificación ( $F_{rg}$ ), la tasa de consumo de biomasa por unidad de área ( $\dot{m}_{bms}$ ), la velocidad del frente de llama ( $V_{ff}$ ), la temperatura máxima alcanzada en el interior del gasificador ( $T_{m\acute{a}x}$ ) y el poder calorífico del gas en función de la composición del gas. Para su cálculo, en el experimento se mide la velocidad superficial del aire (SV, flujo volumétrico de agente gasificante/sección transversal del gasificador), el campo de temperaturas, la composición del gas de gasificación, los análisis último y próximo de la biomasa, el tamaño de partículas y la densidad de la biomasa. Además, la relación combustible/aire ( $F_{rg}$ ) permite estudiar procesos de combustión con exceso o defecto de combustible. En el cuadro 1 se describen las ecuaciones que relacionan estos términos. El  $F_{rg}$  se estima mediante la medición del tiempo que cada termopar tarda en alcanzar los 300 °C, como se describe en las ecuaciones del Cuadro 9. El poder calorífico del gas se calcula mediante la concentración de las especies principales; el rendimiento energético resulta de la ecuación de la eficiencia energética gas frío (%).

**CUADRO 9: BASE DE FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS EXPERIMENTALES.**

Parámetro	Relación matemática
Relación combustible / aire (-)	$F_{rg} = \frac{\dot{m}_{bms} / \dot{m}_{air}}{F_{stq}}$
Poder calorífico inferior (b. s.) (kJ / Nm <sup>3</sup> o kJ / kg)	$PCI_{pg} = \sum_j X_j \times PCI_j$ $\therefore j = CO, CH_4, H_2$
Eficiencia energética gas frío (%)	$\eta_{cold-gas} = \left( \frac{E_{gp}}{E_{bms}} \right)$

**Donde:**

$$E_{gp} = a(h^{-0}_{ff} * CO - h^{-0} * CO_2) + C(h^{-0}_f * H_2O) + d(h^{-0}_{ff} * CH_4 - h^{-0}_f * CO_2 - h^{-0} * H_2O)$$

$$E_{gp} = PCI_{m * bms} M_{bms}$$

$$a = \frac{\%CO}{\%CO + \%CO_2 + \%CH_4}, \quad c = \frac{\%H_2}{\%CO + \%CO_2 + \%CH_4}, \quad d = \frac{\%CH_4}{\%CO + \%CO_2 + \%CH_4}$$

Uno de los proyectos de gasificación de biomasa más grandes del mundo es la planta de biomasa de Ironbridge, con una capacidad de 740 MW, está localizada en Severn Gorge, Reino Unido, y es la planta de energía de biomasa pura. Las instalaciones, que hace años fueron utilizadas como una central eléctrica de carbón con una capacidad instalada de 1,000 MW, fue reconvertida junto a las dos unidades de la central para la generación de energía a partir de biomasa en 2013. La planta es actualmente propiedad de la empresa británica E.ON, quien además es la encargada de su operación empleando pellets de madera para generar energía de biomasa (Figura 23).





**FIGURA 23: VISTA AÉREA DE LA PLANTA IRON BRIDGE QUE CONVIERTE LOS PELLETS DE MADERA ENERGÍA. ES UNA DE LAS PLANTAS MÁS GRANDES DEL MUNDO.**

## PIRÓLISIS

Los procesos de pirólisis, consisten en el calentamiento de la biomasa a unos 600°C en ausencia de aire y están bien establecidos en los países industrializados. En ellos se obtiene un gas de pirólisis, que normalmente se utiliza como fuente de calentamiento del mismo proceso, un alquitrán o bioaceite que puede servir como combustible para motores (Bioaceite procesado) y el carbonizado o carbón de leña, que es un combustible que arde sin la producción de humos apto para uso doméstico e industrial como reductor; cuando este carbonizado es amorfo como es el caso del proveniente de aserrín u otro material blando, se puede briquetear, para facilitar su manejo. La velocidad de calentamiento en la pirólisis es muy importante en la selección del producto final, velocidades de pirólisis altas y tiempos de residencias bajas (pirólisis flash), se obtienen rendimientos en alquitranes líquidos superiores a 60%, los cuales se pueden hidrogenar para mejorar su poder calorífico; cuando la velocidad de calentamiento es lenta el producto de mayor rendimiento es el carbonizado o carbón de leña. En la Figura 24 se muestra una planta de vapor por pirólisis.

## Planta para producir vapor por Pirolisis



FIGURA 24: DETALLE DE UNA PLANTA DE PIROLISIS.

# SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA


La materia prima es la que en últimas instancias selecciona el proceso: para madera se utiliza principalmente los procesos térmicos, debido a que los altos contenidos de lignina dificultan el desarrollo de microorganismos que intervienen en el proceso biotecnológico. Para grasas y residuos de alimentos, la ruta biológica tiene ventajas, pero cuando se parte de compuestos con altos contenidos de azúcares las rutas químicas y biológicas pueden tener igual aproximación. Además, los procesos térmicos necesitan biomasa con baja humedad y para procesos biológicos el contenido de humedad es menos importante. Otros factores a tener en cuenta en el momento de la selección de la tecnología, son la logística de manejo, el transporte, el almacenamiento, el sitio y la calidad de la materia prima.

Algunos expertos comentan, que la pirólisis flash tiene ventajas frente a diferentes tecnologías para producir gasolina, diesel y combustible jet; la hidrólisis ácida tiene el problema de la disposición y el control ambiental y también se debe considerar la escala del proyecto, los tanques de fermentación son económicos mientras que los reactores a altas presiones son demasiado costosos.

A pequeña escala y para la utilización de residuos forestales en forma de astillas, se puede recurrir al uso de calderas, su conversión de diésel a biomasa y a la gasificación. En la Figura 25 se muestra un gasificador de 20 Kw que trabaja con astillas.



**FIGURA 25:** GASIFICADOR DE 20 KW DE LA EMPRESA ALL POWER LAB DE ESTADOS UNIDOS.



*Todo hombre que  
conozco es superior  
a mí en algún  
sentido.*

*En ese sentido,  
aprendo de él.*

*Emerson (1803-1882)*

# COSTOS

Como ya se ha explicado en los apartados anteriores, al hablar de biomasa para usos energéticos nos estamos refiriendo a diferentes materias primas, cadenas de suministro, combustibles y tecnologías de conversión a energía. Todo ello aparece reflejado en los costos, que variarán en función de los diferentes aspectos que se tomen en consideración y abarcarán un amplio rango de valores. Para analizar mejor este aspecto, a continuación se analizan los costes de las materias primas, de la logística y cadenas de suministro, de las plantas de transformación de biomasa a energía, llegando finalmente a los costes normalizados de energía.

Para cultivos dendroenergéticos, los costos de producción y aprovechamiento en el campo deben incluir los costos asociados a la adquisición de las semillas y plantas, establecimiento y labranza de la tierra, la cosecha, irrigación en el caso de ser necesario, los fertilizantes y los pesticidas. Dichos costos varían ampliamente en función de los precios del jornal de trabajo, el tipo de maquinaria a utilizar, el valor de tierra y otros insumos.

En el Cuadro 10 se recogen rendimientos y costos de producción y recolección de diferentes materias primas, que han sido elaborados por el IPCC en el 2011, a modo de síntesis de diferentes trabajos publicados. Como se puede observar en los datos que se presentan, tanto los rendimientos como los costos varían ampliamente según las diferentes partes del mundo y los diversos tipos de materia prima.

**CUADRO 10: RENDIMIENTOS Y COSTES DE PRODUCCIÓN Y RECOLECCIÓN DE DIFERENTES MATERIAS PRIMAS DE BIOMASA EN EL MUNDO.**

Materia prima	Región	Rendimiento GJ/ha/año	Coste US\$ <sub>2005</sub> /GJ
<b>Cultivos energéticos</b>			
<i>Miscanthus</i>	Europa	190-280	4,8-16
<i>Paricum virgatum</i> (Switchgrass)	Europa	120-225	2,4-3,2
<i>Paricum virgatum</i> (Switchgrass)	Norte de América	103-150	4,4
<i>Árboles rotación corta</i>	Sur de Europa	90-225	2,9-4
<i>Eucaliptus</i>	Sur de América	150-415	2,7
<i>Sauce (rotación corta)</i>	Europa	140	4,4
<i>Astillas madera</i>	Europa	110	3,4-13,6
<i>Astillas madera</i>	Centro de América	80-150	1,8-2
<b>Residuos primarios</b>			
<i>Paja de trigo</i>	Europa	60	1,9
<i>Paja de trigo</i>	USA	7-75	N.D.
<i>Paja de azúcar de caña</i>	Brasil	90-126	N.D.
<i>Cañote de maíz</i>	Norte de América	15-155	N.D.
<i>Cañote de maíz</i>	India	22-30	0,9
<i>Rastrojo de sorgo</i>	Mundo	85	N.D.
<i>Residuos forestales</i>	Europa	2-15	1-7,7

FUENTE: IPCC (2011).

## LOGÍSTICA Y CADENAS DE SUMINISTRO

La biomasa normalmente está disponible en formas con densidad baja, por lo que se necesita para su almacenamiento, transporte y tratamiento más espacio que para los combustibles fósiles equivalentes, lo cual tiene implicaciones en los costos. La biomasa a menudo necesita ser procesada (pretratamiento) para mejorar su manejo. Para la mayor parte de los sistemas y cadenas de suministro de biomasa el tratamiento y transporte de la biomasa desde la localización de la materia prima hasta la planta de conversión a energía es un componente importante del costo total de producción de energía.

La recogida, almacenamiento, transporte, pre-tratamiento y entrega de la biomasa puede suponer entre el 20 por 100 y el 50 por 100 de los costos totales de producción de energía (IPCC, 2011). Tanto el informe del IPCC como el de la European Climate Foundation señalan que existe un potencial significativo en cuanto a reducción de costos en muchas de las fases clave de las diferentes cadenas de suministro de la biomasa, principalmente por efecto escala y por efecto aprendizaje. En cuanto a los cultivos energéticos, hay margen de mejora en los equipos de plantación; margen para la reducción de los costos de corta; áreas mayores y más concentradas dedicadas a cultivos energéticos permitirán la utilización de equipos especializados y reducirán los costos de transporte; los costos de fertilización pueden disminuir (entre el 10 y el 15 por 100) utilizando el conocimiento de la nutrición de la especie y la silvicultura clonal; al utilizarse a mayor escala disminuirán los costos de la cosecha (20 por 100 del costo total) al usar cosechadoras especializadas más eficientes.

Los residuos forestales se vienen utilizando en Finlandia y Suecia desde hace muchos años. En dichos países, entre 1975 y 2003 los costos de recogida de residuos forestales disminuyeron un 15 por 100 cada vez que se doblaba la capacidad de producción acumulada. En 2003 los costos eran la tercera parte de dichos costos en 1975. La mitad de los residuos agrícolas que se utilizan en la Unión Europea para producir energía se recogen en Dinamarca, donde se aprovecha para uso energético entre el 30 por 100 y el 50 por 100 de sus residuos agrícolas, lo cual supone para dicho país la total utilización pues el resto debe dejarse en los campos como nutriente o para ser utilizado por el ganado. Hay margen de reducción de costos en cada una de las fases de amontonamiento, transporte, carga y almacenamiento de los residuos. Los costos se pueden reducir un 20 por 100 haciendo balas más grandes y densas, utilizando equipos especializados que aumentan la densidad de las balas en un 30 por 100. Los costos de almacenaje pueden ser reducidos hasta un 90 por 100 si las balas son almacenadas al aire libre, adecuadamente protegidas (por túneles de plástico, por ejemplo).

Para los pellets importados por Europa desde el Sudeste de Estados Unidos, entre 2010 y 2020, los costos se pueden reducir un 20 por 100 a través de mejoras en las prácticas en la cosecha (consolidación de la mecanización), economías de escala, mejoras en cuanto a operación de las fábricas de pellets y optimización en el transporte (European Climate Foundation, 2010). Análisis de cadenas de suministro de biomasa muestran que el transporte por carretera de biomasa abultada y sin tratar es no competitiva y energéticamente ineficiente para distancias superiores a 50 Km. Para mayores distancias se requiere pretratamiento y densificación en la cadena de suministro. Teniendo en cuenta el uso de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero, cadenas logísticas bien organizadas pueden requerir menos del 10 por 100 del contenido inicial de energía de la biomasa, pero ello requiere escala en el transporte, pre-tratamiento eficiente y minimización de transporte de la biomasa no tratada (IPCC, 2011).

## COSTOS DE LAS PLANTAS DE TRANSFORMACIÓN A ENERGÍA

En el Cuadro 11 se presentan los costes de inversión y de operación y mantenimiento (O&M) por kW, así como niveles de eficiencia, tamaño típico de planta y media de tiempo de vida para diferentes tipos de plantas de transformación que utilizan diferentes combustibles de biomasa. Los datos proceden de un estudio realizado a nivel de Unión Europea.

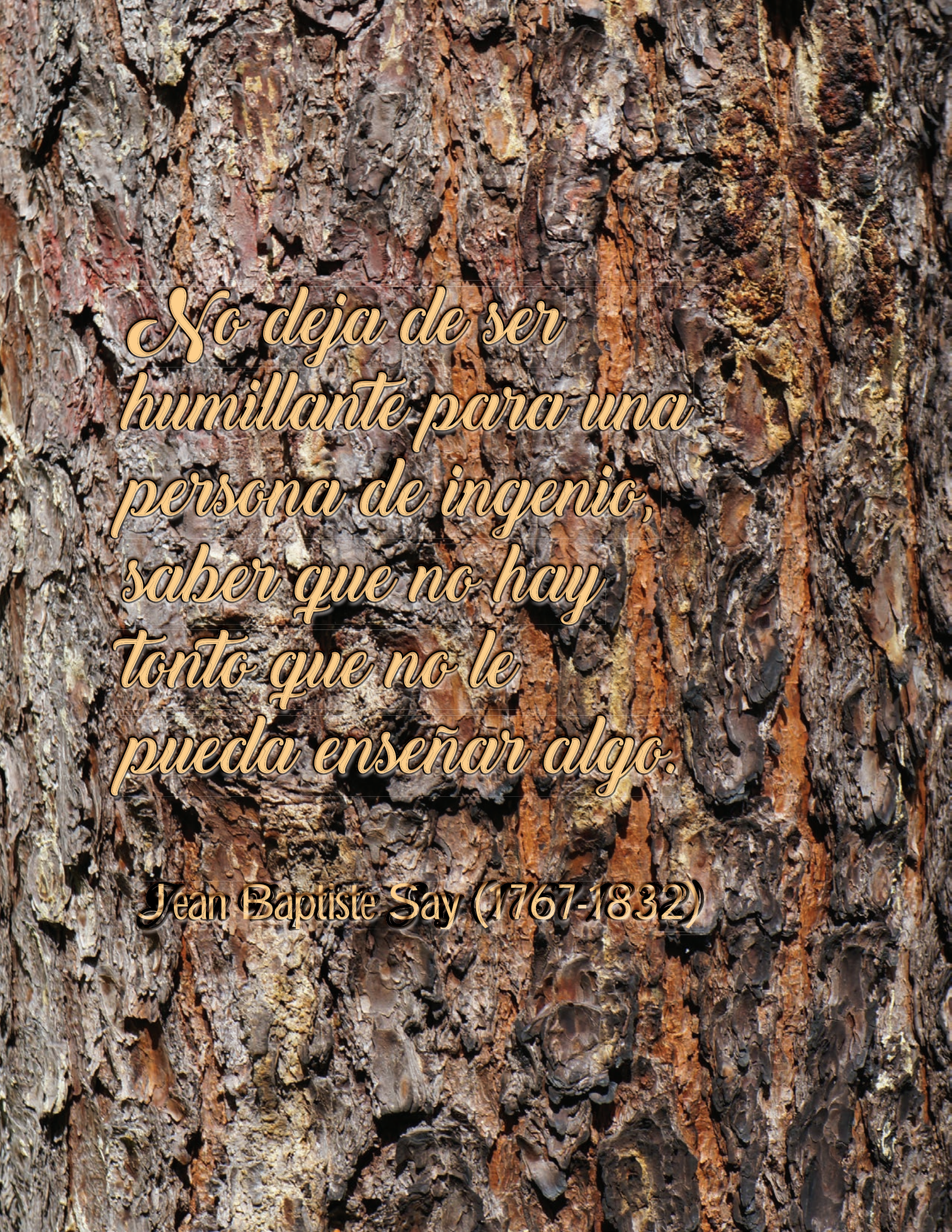
**CUADRO 11: NIVELES DE EFICIENCIA Y COSTES DE INVERSIÓN Y DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DE CONVERSIÓN DE BIOMASA A ENERGÍA.**

Tipo de biomasa	Especificación de planta	Costes de inversión [€/kW <sub>e</sub> ]	Costes de O&M [€/kW <sub>e</sub> /año]	Eficiencia (electricidad) [%]	Eficiencia (calor) [%]	Tiempo de vida (media) [años]	Tamaño típico planta [MW <sub>e</sub> ]
Biomasa sólida	Biomasa	2.225-2.995	84-146	0,26-0,3	–	30	1-25
	Co-combusti.	450-650	65-95	0,37	–	30	–
	Biom. Co-gen	2.600-4.375	86-176	0,22-0,27	0,63-0,66	30	1-25
	Co-com co-ge	450-650	85-125	0,2	0,6	30	–
Biogás	Agricultura	2.550-4.290	115-140	0,28-0,34	–	25	0,1-0,5
	Agric. Co-gen	2.765-4.525	120-145	0,27-0,33	0,55-0,59	25	0,1-0,5
	Vertedero	1.350-1.950	50-80	0,32-0,36	–	25	0,75-8
	Vert co-gen	1.500-2.100	55-85	0,31-0,35	0,5-0,54	25	0,75-8
	Agua resid.	2.300-3.400	115-165	0,28-0,32	–	25	0,1-0,6
	Agua resid. co-gen	2.400-3.550	125-175	0,26-0,3	0,54-0,58	25	0,1-0,6
Fracción orgánica de RSU	Incin. RSU	5.500-7.125	145-249	0,18-0,22	–	30	2-50
	In RSU co-ge	5.800-7.425	172-258	0,14-0,16	0,64-0,66	30	2-50

FUENTE: DE JAGER *et al.* (2011).

### Como se puede observar en el cuadro 11:

- Los costos más altos, tanto de inversión como de O&M corresponden a las plantas que permiten el aprovechamiento energético a partir de la incineración de residuos sólidos urbanos.
- Los costos más bajos de inversión se alcanzan para la co-combustión utilizando biomasa sólida, siendo también bajos los costos de O&M.
- En cuanto a las plantas que utilizan biogás, las que presentan menores costos, tanto de inversión como de O&M, son las que tienen su origen en vertederos, y las que presentan mayores costos son las que utilizan productos agrícolas.
- En general, la cogeneración implica un aumento en los costos de inversión y de O&M en torno al 5 por 100.



*No deja de ser  
humillante para una  
persona de ingenio,  
saber que no hay  
tonto que no le  
pueda enseñar algo.*

*Jean Baptiste Say (1767-1832)*



# **ESTUDIOS DEL EFECTO DE DIFERENTES FACTORES (ESPACIAMIENTOS, ESPECIES, EDADES Y SITIOS). PRUEBAS DE LABORATORIO APLICABLE A LA BIOMASA SEGÚN NORMAS ESTANDARIZADAS**

---

En esta sección se propone el abordaje metodológico básico para el estudio de los efectos de las plantaciones dendroenergéticas en las propiedades tecnológicas y especialmente la transformación de la biomasa en energía mediante el proceso de gasificación. El objetivo es que el estudiante comprenda la metodología a seguir bajo un diseño experimental y utilizando los protocolos de análisis y validación de los datos.

## **PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN**

En el Cuadro 12 se muestran los aspectos principales de un abordaje metodológico para cumplir con el objetivo de aumentar la eficiencia energética de biomasa proveniente de plantaciones energéticas mediante el proceso de gasificación.

**CUADRO 12: OBJETIVOS, PRODUCTOS Y ACTIVIDADES DENTRO DE UN PROCESO DE INVESTIGACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LA BIOMASA DE PLANTACIONES DENDROENERGÉTICAS.**

OBJETIVO ESPECÍFICO	PRODUCTOS	ACTIVIDADES
<p>Determinar la productividad de una plantación energética utilizando clones o material genético superior bajo tres densidades de siembra.</p>	<p>Plantación energética establecida con clones o material genético superior y bajo tres densidades.</p> <p>Turno de rotación de la plantación energética.</p>	<p>Establecer la plantación energética con clones o material genético superior y bajo tres densidades de siembra (10,000, 15,000 y 20,000 n/ha).</p>
<p>Determinar las propiedades físicas, energéticas y de biomasa provenientes de las plantaciones energéticas.</p>	<p>Tabla con las propiedades físicas, energéticas y de biomasa por cada densidad de plantación y clon utilizado.</p> <p>Publicación en revista indexada.</p>	<p>Realizar el muestreo semestral de la plantación energética.</p> <p>Determinar las propiedades físicas (diámetro, altura, densidad y peso específico) de cada clon y densidad de plantación en cada muestreo.</p> <p>Determinar las propiedades energéticas (poder calorífico, cenizas, volátiles y contenido de humedad) de cada clon y densidad de plantación en cada muestreo.</p> <p>Determinar la biomasa (ton/ha de biomasa en fuste, ramas, corteza y hojas, producción energética</p> <p>GJ/ton/ha de biomasa en fuste y ramas) de cada clon y densidad de plantación en cada muestreo.</p> <p>Preparación de artículo científico.</p>
<p>Determinar la eficiencia del proceso de gasificado y la composición del syngas producido.</p>	<p>Tabla con los porcentajes de eficiencia y la composición del syngas del proceso de gasificado por densidad y muestreo.</p> <p>Publicación en revista indexada.</p>	<p>Realizar el proceso de gasificación de cada muestreo, para cada clon y densidad de plantación.</p> <p>Determinar los porcentajes de eficiencia durante el proceso de gasificación de cada muestreo, para cada clon y densidad de plantación.</p> <p>Determinar la composición del syngas producido durante el proceso de gasificación de cada muestreo, para cada clon y densidad de plantación.</p>

**OBJETIVO ESPECÍFICO 1:** Determinar la productividad de una plantación energética utilizando clones o material genético superior bajo tres densidades de siembra.

## **ESTABLECIMIENTO DE PLANTACIÓN DENDROENERGÉTICA:**

Se establecerá una plantación energética bajo tres densidades de siembra de 10,000, 15,000 y 20,000 árboles por hectárea con clones o material genético superior. Se seleccionan estas densidades debido a que en estudios previos (Tenorio *et al.* 2016) se muestra que las mejores densidades de plantación se encuentran entre 10,000 y 15,000 árboles/hectárea. La plantación será establecida en un sitio representativo y muy cercano donde se encuentre instalado el gasificador. Para el establecimiento y mantenimiento de la plantación se contará con la ayuda del personal de la universidad. La plantación será dividida en 18 unidades de muestreo (3 densidades x 2 clones o procedencias x 3 repeticiones) con un área por parcela de 160 m<sup>2</sup>. La selección de los clones o material genético superior se realiza siguiendo los intereses de la universidad, buscando el material que ha tenido mejor desempeño en relación a la producción de volumen y mayor densidad.

## **DETERMINACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD.**

La productividad será evaluada considerando la producción de biomasa por unidad de superficie, toneladas por hectárea. Así mismo la evaluación de este parámetro se llevará a cabo cada 6 meses en un período total de 1.5 años. En cada unidad experimental serán muestreados cinco árboles (2 clones o procedencias x 3 espaciamientos x 3 bloques x 5 árboles = 90 árboles), a los cuales se les determinará su diámetro, altura y la biomasa contenida en las diferentes partes del árbol (hojas, ramas y fuste). La determinación de estas variables se realizará siguiendo el procedimiento detallado por (Tenorio *et al.* 2016). Luego estos parámetros serán proyectados para calcular la biomasa por hectárea para cada tipo de densidad de plantación y material genético.

## **ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.**

Los valores de biomasa determinados en el muestreo, serán utilizados para establecer la densidad y material genético con las mejores características para la producción de biomasa. Así mismo con esta información será posible establecer cuáles son los valores energéticos en relación a la producción de calor (MJ/ha), detallado en la metodología del objetivo específico 2, y a la producción de syngas que será detallado en la metodología del objetivo específico 3.

**OBJETIVO ESPECÍFICO 2:** Determinar las propiedades físicas, químicas y de biomasa provenientes de las plantaciones energéticas.

## **MUESTREO DE ÁRBOLES EN LA PLANTACIÓN Y MUESTREO EN EL ÁRBOL:**

De cada unidad de muestreo será extraída una muestra de las diferentes partes del árbol (hojas, ramas y fuste). En el caso del fuste serán extraídas seis secciones transversales de 10 cm de largo en tres diferentes alturas: dos muestras en la base del árbol, dos muestras en la altura total y dos muestras al 50% de la altura total. Todo el material de las diferentes partes será molido para realizar las diferentes determinaciones.

## **DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD, PESO ESPECÍFICO Y DENSIDAD VERDE:**

Para el cálculo del contenido de humedad (MC) de las hojas, ramas y fuste se utilizará la norma ASTM D-4442 (ASTM, 2007). Y para la determinación del peso específico en el fuste, se utilizará la norma ASTM D-143 (ASTM, 2014).

## **DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y ENERGÉTICAS:**

El material granulado del fuste (madera y corteza) será utilizado en la determinación de las características químicas de porcentaje de Carbono (C), Nitrógeno (N) y la relación C/N, así mismo el análisis de los macro y micro elementos contenidos en la biomasa, se llevaron a cabo en el laboratorio de suelos de la universidad. Las características energéticas de poder calórico, porcentaje de cenizas y porcentaje de volátiles también serán determinados. El poder calórico se determinará usando la prueba calorimétrica de Parr's mediante la norma ASTM D-5865 (ASTM, 2004), el porcentaje de cenizas se llevará a cabo siguiendo el procedimiento detallado en la norma ASTM D 1102 (ASTM, 2013c) y para el porcentaje de volátiles se seguirá la norma ASTM D1762 (ASTM, 2013d).

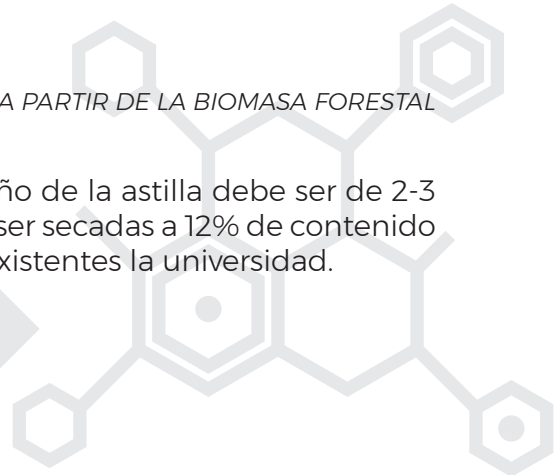
## **ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.**

Las distintas propiedades detalladas anteriormente se realizarán para cada densidad y material genético, de forma que permita establecer cuál será la densidad y el material genético con las mejores condiciones de biomasa para producir calor o bien en el proceso de gasificado detallado a continuación.

**OBJETIVO ESPECÍFICO 3:** Determinar la eficiencia del proceso de gasificado y la composición del syngas producido.

## **MUESTREO Y PREPARACIÓN DEL MATERIAL.**

De cada uno de los muestreos semestrales de la plantación serán cosechados en condición seca de cada densidad y material genético utilizado, aproximadamente 40 kilos de madera para ser utilizados en el proceso de gasificado.



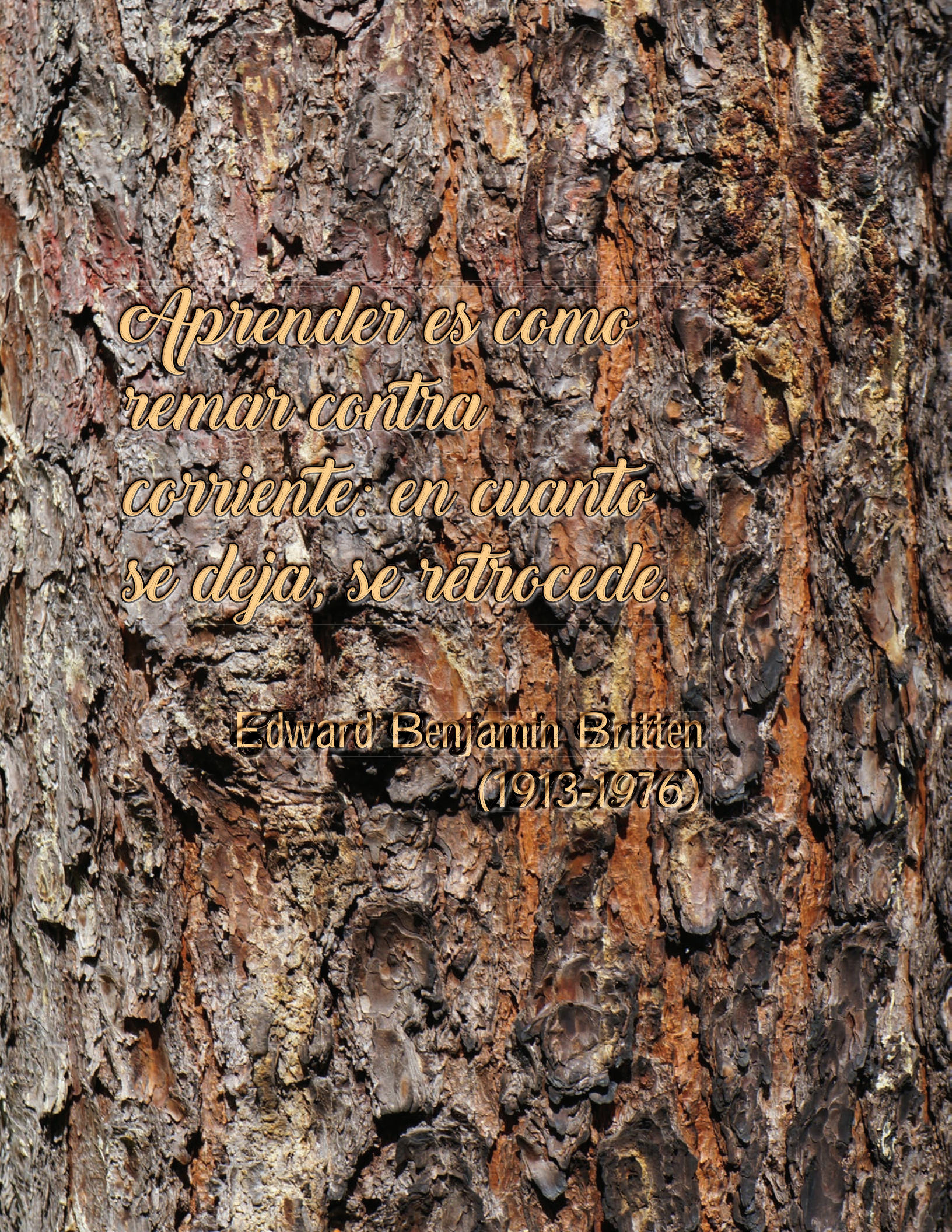
El material cosechado en condición verde será astillado. El tamaño de la astilla debe ser de 2-3 cm ancho, 1 cm de espesor y 5-6 cm de largo. Estas astillas deben ser secadas a 12% de contenido de humedad. El astillado y el secado se realizará en los equipos existentes la universidad.

- Equipo de prueba de gasificación.
- Se utilizará el equipo que dispone la universidad.
- Prueba de gasificación.

De cada muestreo realizado (semestral) y para cada densidad de plantación se llevarán a cabo dos corridas de producción de gas en el gasificador, con una duración de al menos 1 hora en cada prueba. En esta prueba los variables que se medirán son: (i) Cantidad de material consumido por hora, (ii) variación de temperatura en el lecho fluidizado y salida de gas, (iii) flujo de gas y (iv) gas producido. Así mismo es necesario medir los diferentes componentes del gas luego de la gasificación, emisiones de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>, principalmente.

## DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA

La información recolectada durante las pruebas y la información química de la biomasa detallada en el objetivo específico 2 permitirá determinar el índice de equivalencia de la biomasa (syngas producido/biomasa de entrada), índice de eficiencia (relacionada a tipo de biomasa). En la determinación de estos parámetros se seguirá el procedimiento detallado en Sharma y Sheth (2016) y Singh y Sekhar (2015).



*Aprender es como  
remar contra  
corriente: en cuanto  
se deja, se retrocede.*

*Edward Benjamin Britten  
(1913-1976)*

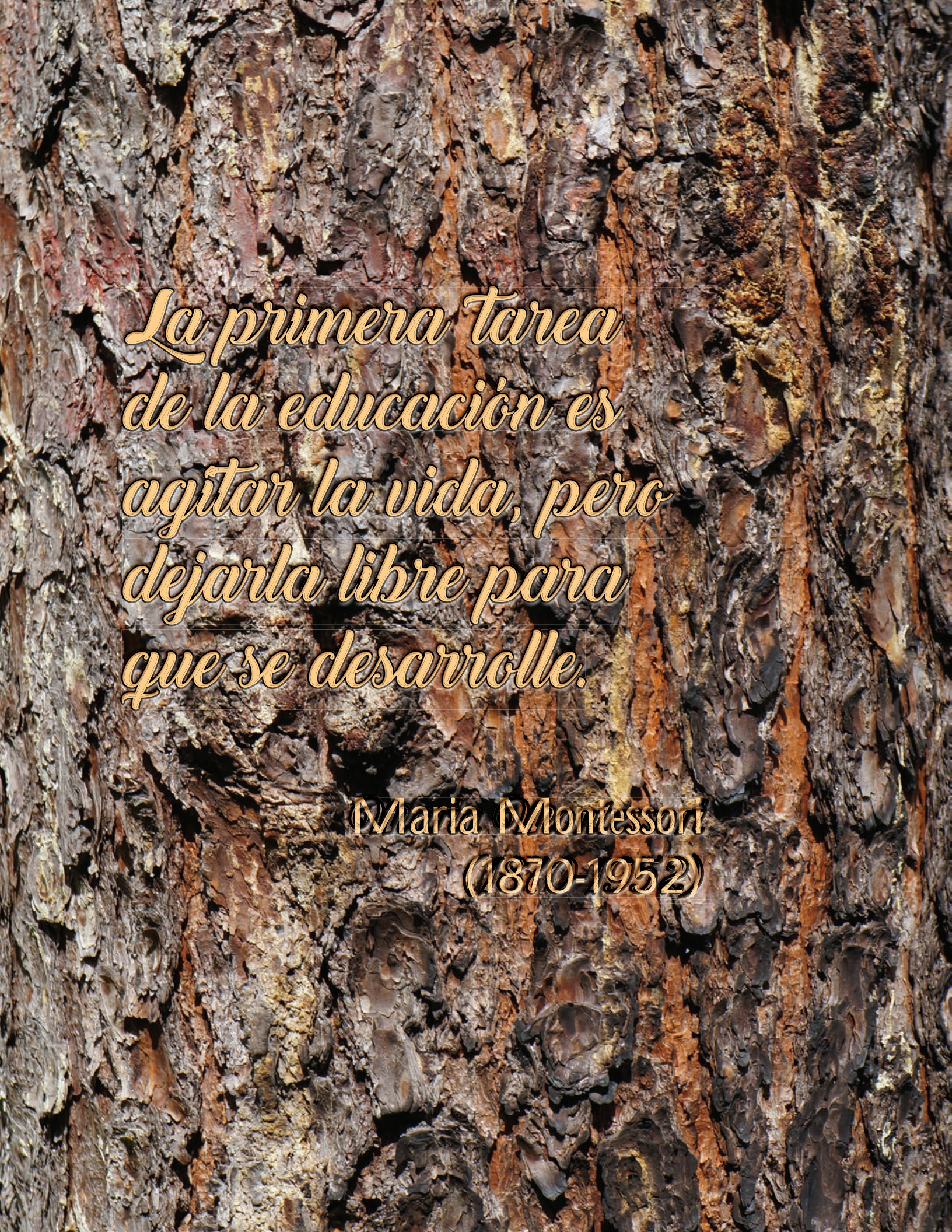
# BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA DE ESTA SECCIÓN

- ASTM. (2014). D143-14. Standard test method for small clear specimens of timber. ASTM International, West Conshohocken, PA. [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM. (2007). D4442-07. Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA. [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM. (2013a). D1110-84. Standard test methods for water solubility of wood. ASTM International, West Conshohocken, PA. [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM. (2013b). D1107-96. Standard test method for ethanol-toluene solubility of wood. ASTM International, West Conshohocken, PA. [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM. (2004). D5865-04. Standard test method for gross calorific value of coal and coke. ASTM International, West Conshohocken, PA. [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM. (2013c). D1102-84. Standard test method for ash in wood. ASTM International, West Conshohocken, PA. [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM. (2013d). D1762-84. Standard test method for ash in wood. ASTM International, West Conshohocken, PA. [www.astm.org](http://www.astm.org)
- Betters, D.R., Wright, L.L., Couto, L., (1991). Short rotation woody crop plantations in Brazil and the United States. *Biomass Bioenergy*. 1(6), p 305-316.
- DeBell, D. S., Clendenen, G. W., Harrington, C. A., Zasada, J.C., (1996). Tree growth and stand development in short-rotation *Populus* plantings: 7-year results for two clones at three spacings. *Biomass Bioenergy*. 11(4), p 253-269.
- Dickmann, D.L., (2006). Silviculture and biology of short rotation woody crops in temperate regions: then and now. *Biomass Bioenergy*. 30, p 696-705.
- Evans, A., Strezov, V., Evans, T.J., (2010). Sustainability considerations for electricity generation from biomass. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 14, p 1419-1427.

- FAO, State of the world's forests, (2012), Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, (2012).
- Gokcol, C., Dursunb, B., Alboyaci, B. and Sunan, E. (2009). "Importance of biomass energy as alternative to other sources in Turkey," *Energy Policy* 37, p 424-431.
- Hauk, S., Knoke, T., Wittkopf, S., (2014). Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—A review. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 29, p 435-448.
- Hinchee, M., Rottmann, W., Mullinax, L., Zhang, C., Chang, S., Cunningham, M., Nehra, N., (2009). Short-rotation woody crops for bioenergy and biofuels applications. *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant.* 45(6), p 619-629.
- Kaliyan, N. and Morey, R.V. (2009). "Factors affecting strength and durability of densified biomass products," *Biomass Bioenergy* 33, p 337-359.
- Kullander, S., (2009). Energy from biomass. *Eur Phys J Spec Top.* 176, p 115-125.
- Kumar, T; Sheth, P. (2015). Biomass gasification models for downdraft gasifier. A state of the art review. *Renewable and sustainable energy reviews.* 50: p 583-593.
- Le Maire, G., Dupuy, S., Nouvellon, Y., Loos, R. A., Hakamada, R., (2014). Mapping short-rotation plantations at regional scale using MODIS time series: Case of eucalypt plantations in Brazil. *Remote Sens. Environ.* 152, p 136-149.
- Liu, Y., Xu, Y., Zhang, F., Yun, J., Shen, Z., (2014). The impact of biofuel plantation on biodiversity: a review. *Chin. Sci. Bull.* 59(34), p 4639-4651.
- Luque, R., Herrero-Davila, L., Campelo, J.M., Clark, J.H., Hidalgo, J.M., Luna, D., Marinasa, J.M. and Romero, A.A. (2008). "Biofuels: a technological perspective," *Energy Environ. Sci.* 1, p 542-564.
- Moya, R., Tenorio, C., (2013). Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica. *Biomass Bioenergy.* 56, p 14-21
- Navarro-Camacho, R., Esquivel-Segura, E., Briceño-Elizondo, E., Arias-Aguilar, D., (2014). Estimating aboveground biomass for *Eucalyptus saligna* Sm. and *Eucalyptus camaldulensis* Dehn in the center region of Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú.* 11(27), p 22-33.
- Perez JF, Melgar A, Benjumea PN. (2012). Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: an experimental study. *Fuel.* 96: p 487-96.
- Plis P, Wilk RK. (2011). Theoretical and experimental investigation of biomass gasification process in a fixed bed gasifier. *Energy.* 36: p 3838-45.



- Ruiz, JA; Juárez, MC; Morales, MP; Muñoz, P; Mendivil, MA. (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and sustainable energy reviews*. 18: p 174-183.
- Singh, V. C. J., & Sekhar, S. J. (2015). Performance studies on a downdraft biomass gasifier with blends of coconut shell and rubber seed shell as feedstock. *Applied Thermal Engineering* 97: p 22-27
- Sharma, S., & Sheth, P. N. (2016). Air-steam biomass gasification: Experiments, modeling and simulation. *Energy Conversion and Management*, 110, p 307-318.
- Stelte, W., Clemons, C., Holm, J.K., Sanadi, A.R., Ahrenfeldt, J., Shang, L. and Henriksen, U.B. (2011a). "Pelletizing properties of torrefied spruce," *Biomass Bioenergy* 35, p 4690-4698.
- Tenorio, C; Moya, R; Tomazello Filho, M; Valaert, J. (2015). Quality of pellets made from agricultural and forestry crops in Costa Rican tropical climates. *BioResources*, 10(1): p 482-498.
- Tenorio, C; Moya, R; Arias-Aguilar, E; Briceño-Elizondo, E. (2016). Biomass yield and energy potential of short-rotation energy plantations of *Gmelina arborea* one year old in Costa Rica. *Industrial Crops and Products*. 82: p 63-73.
- Vassilev SV, Baxter D, Andersen LK, Vassileva CG, Morgan TJ. (2012). An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel*. p 94:1-33.
- Zou W, Song C, Xu S, Lu C, Tursun Y. Biomass gasification in an external circulating countercurrent moving bed gasifier. *Fuel*, Available on-line June (2012) 10.1016/j.fuel.2012.06.061.



*La primera tarea  
de la educación es  
agitar la vida, pero  
dejarla libre para  
que se desarrolle.*

*Maria Montessori  
(1870-1952)*

# BIBLIOGRAFÍA

---

- Bauen, A. B. (05 de 2009). Bioenergy A sustainable and reliable energy source. Retrieved from <http://www.ieabioenergy.com>.
- Britos, J. y Leguizamón, A. (2013), Manual de plantaciones forestales, Técnicas de instalación y manejo. Paraguay: Instituto Forestal Nacional.
- Chu, S. and J. Goldemberg (2007). Lighting the way: Toward a sustainable energy future, Inter-academy Council.
- Correa-Méndez, F, Carrillo-Parra, A, Rutiaga-Quiñones, J. G., Márquez-Montesino, F, González-Rodríguez, H., Jurado-Ybarra, E., & Garza-Ocañas, F. (2014). Contenido de humedad y sustancias inorgánicas en subproductos maderables de pino para su uso en pélets y briquetas. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente, 20(1), 77-88.
- Deiana, A., Petkovic, L., Silva, H., Aguilar, E., Sardella, M., & Venturini, R. (2002). Residuos y subproductos para la obtención de briquetas de Carbón Activado. Proceedings of the VI Curso-Taller Iberoamericano de Adsorbentes y Catalizadores para la Protección Ambiental, Redes Temáticas VC y VC-CYTED, 9.
- Detalle de una cocina mejorada <http://cocinasmejoradasperu.org.pe/noticias/campana-de-venta-de-cocinas-mejoradas-recorre-zonas-de-putina-punco-y-alto-inambari-en-puno/> (Octubre, 2017).
- CONCEREAL (2011). Norma Europea sobre la calidad del pellet: EN 14961-2. Retrieved from [http://www.concereal.es/norma\\_EN14961-2](http://www.concereal.es/norma_EN14961-2).
- DE JAGER *et al.* (2011): Financing Renewable Energy in the European Energy Market. Informe final. Ecofys. Utrecht.
- Escobar, J. (2013). Biomasa lignocelulósica en Brasil Perspectivas de uso para pellets y briquetas en el sector industrial. The Bioenergy International, (18), 38-39.
- European Commission, E. (2013). Producción e importaciones de energía. Retrieved from [http://epp.eu-rostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Energy\\_production\\_and\\_imports/es](http://epp.eu-rostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Energy_production_and_imports/es).
- EUROPEAN CLIMATE FOUNDATION (2010): Biomass for heat and power. Opportunity and economics.

- EUROPEAN COMMISSION (2010): On sustainability requirements for the use of solid and gaseous biomass sources in electricity, heating and cooling. Report from the Commission to the Council and the European Parliament.
- Horttanainen, M., Saastamoinen, J. & Sarkomaa, P. (2002). Operational limits of ignition front propagation against airflow in packed beds of different Wood fuels. *Energy and Fuels*, 16, 676-686.
- IPCC (2011): Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Chapter 2, «Bioenergy».
- Lenis, Y., Agudelo, A.F. & Pérez, J.F. (2013). Analysis of statistical repeatability of a fixed bed downdraft biomass gasification facility. *Applied Thermal Engineering*, 51, 1006-1016.
- Loo, S. v. (June 2014). Biomass Combustion and Cofiring. Retrieved from <http://www.ieabcc.nl>.
- Masek, O., Konno, M., Hosokai, S., Sonoyama, N., Norinaga, K. & Hayashi, J. (2008). A study on pyrolytic gasification of coffee grounds and implications to other thermal gasification. *Biomass and Bioenergy*, 32, 78-89.
- Mohan, D., Pittman, C.U. & Steele, P.H. (2006). Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels*, 20, 848-889.
- NETL (November 2008). Carbon Sequestration Atlas of the United States and Canada. Obtained from: The U.S. Department of Energy .
- Núñez, C. A. F., Fajardo, C. A. G., & Vargas, F. E. S. (2012). Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación. *Iteckne*, 9(1), 21-30.
- Patiño, J. F. y Smith, R. (2008). Consideraciones sobre la dendroenergía bajo un enfoque sistemático. *Revista Energética*, Número 39, 19-34.
- Peksa-Blanchard, M. (2007). Global wood pellets markets and industry: policy drivers, market status and raw material potential. Minnesota: I.B.T. 40.
- Porteiro, J., Patiño, D., Collazo, J., Granada, E., Morán, J. & Miguez, J.L. (2010). Experimental analysis of the ignition front propagation of several biomass fuels in a fixed-bed combustor. *Fuel*, 89, 26-35.
- Rincón J.M., Gastón R., Islas J.M., Lizarde J.E. (2014). Potencial de la biomasa y perspectivas en diferentes países. In R. M. Electo (Ed.), *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*. Bogotá, Colombia: Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía.

- Rincón, J, M., Romero, G., Camacho, A., & Montenegro, E. (1996). Combustibles de transporte y medidas para reducir la contaminación. Uso de combustibles oxigenados a la altura de Bogotá. Bogota: Universidad Nacional.
- Rincón, J. (Diciembre 30, 2010). Capítulo 7: Biomasa. Retrieved from Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia PDFNCE: [http://www.upme.gov.co/Sigic/DocumentosF/Vol\\_2\\_Diagnostico\\_FNCE.Pdf](http://www.upme.gov.co/Sigic/DocumentosF/Vol_2_Diagnostico_FNCE.Pdf).
- San Miguel, G. y Gutiérrez, F. (2009). Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. España: MundiPrensa.
- Shin, D. & Choi, S. (2000). The combustion of simulated waste particles in a fixed bed. *Combustion and Flame*, 121, 167-180.
- Valderrama, A., Curo, H., Quispe, C., Llantoy, V., & Gallo, J. (2007). Briquetas de residuos sólidos orgánicos como fuente de energía calorífica en cocinas no convencionales. *Revista de Investigación CEDIT*, 2.



Ingeniería en  
**Energías**  
Renovables