



Producción de pellets a partir de biomasa producida en humedales y residuos de madera

Production of pellets from biomass produced in wetlands and wood residues

Francisco Javier Landa Huerta¹, Mayra Berenice Muñoz Fonseca², Erika Aguilar Acosta³, Nelly Sánchez

Gómez⁴ y César Osvaldo Castillo González⁵

Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico Superior de Xalapa

*Autor de correspondencia:¹ francisco.lh@xalapa.tecnm.mx ² mayra.mf@xalapa.tecnm.mx ³

erika.aa@xalapa.tecnm.mx ⁴ nelly.sg@xalapa.tecnm.mx ⁵ 197003634@itsx.edu.mx

Recibido 27 de marzo 2025; recibido en forma revisada 03 de julio 2025; aceptado 27 de octubre 2025

RESUMEN

La contaminación de agua por *Eichhornia crassipes* (Lirio acuático) y la acumulación de residuos de madereros como el aserrín de pino representan dos problemas ambientales con gran presencia en diversas regiones en México. Este proyecto plantea una solución conjunta a ambas problemáticas mediante la elaboración de pellets como biocombustible sólido. El objetivo fue elaborar y caracterizar pellets densificados a partir de biomasa vegetal, evaluando su comportamiento físico y térmico en diferentes proporciones de la mezcla con almidón de maíz como aglutinante natural.

Para ello, se diseñaron nueve formulaciones experimentales con una masa base de 5 g por muestra y un 10% de aglutinante fijo. Los pellets fueron moldeados manualmente con un peletizador y se evaluaron parámetros como

contenido de humedad, contenido de cenizas, densidad y poder calorífico teórico utilizando la fórmula de Channiwala y Parikh (2002).

Entre los resultados más destacados, se obtuvo una densidad relativa promedio de 1.20 g/cm³ para una muestra de pellets de 2 g. El contenido de humedad se mantuvo alrededor del 11%, considerado óptimo para su combustión. En cuanto al poder calorífico estimado de las mezclas varió entre 15.5 MJ/Kg y 17.8 MJ/Kg siendo mayor en las formulaciones con mayor proporción de aserrín. En conclusión, los pellets elaborados mostraron características físicas y energéticas viables para su uso como biocombustible, confirmando que el aprovechamiento del lirio acuático y el aserrín con un aglutinante accesible como el almidón de maíz representa una estrategia efectiva, replicable y ambientalmente responsable.

Palabras Clave: Pellets, biomasa, humedades, residuos de madera.

ABSTRACT

Water pollution caused by *Eichhornia crassipes* (Water Hyacinth) and the accumulation of sawmill waste, such as pine sawdust, represent significant environmental challenges in various regions of Mexico. This project proposes a combined solution to both issues by producing pellets as a solid biofuel. The objective was to develop and characterize densified pellets made from plant biomass, evaluating their physical and thermal behavior in different mixtures, with corn starch used as a natural binder. To achieve this, nine experimental formulations were designed, with a base mass of 5 g per sample and a fixed 10% binder content. The pellets were manually molded using a pelletizer and assessed for parameters such as moisture content, ash content, density, and theoretical calorific value using the formula proposed by Channiwala and Parikh (2002). The results showed an average relative density of 1.20 g/cm³ for a 2 g pellet sample. The moisture content remained around 11%, which is optimal for combustion. The estimated calorific value of the mixtures ranged from 15.5 MJ/kg to 17.8 MJ/kg, with higher values observed in formulations containing a higher proportion of sawdust. In conclusion, the pellets produced demonstrated viable physical and energetic properties for use as biofuel, confirming that utilizing water hyacinth and sawdust with an accessible binder such as corn starch represents an effective, replicable, and environmentally responsible strategy.

Keywords: Pellets, biomass, moisture content, wood waste

INTRODUCCIÓN

La transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles ha impulsado el desarrollo de biocombustibles sólidos como los pellets de biomasa. Estos son pequeñas piezas cilíndricas densificadas, fabricadas a partir de residuos lignocelulósicos que presentan una alta densidad energética, bajo contenido de humedad, y emisiones significativamente menores de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles (Loo & Koppejam, 2008; International Energy Agency [IEA], 2023). Su uso se ha extendido en Europa, América del norte y Asia para sistemas de calefacción residencial y para aplicaciones industriales de generación energética (Bioenergy Europe, 2022).

Las principales materias primas utilizadas para la elaboración de pellets son el aserrín, virutas de madera, paja, cascarilla de arroz y otros residuos agrícolas y forestales, debido a su disponibilidad, bajo costo y buenas propiedades térmicas (Pradhan, Mahajani, & Arora, 2018). La selección adecuada de biomasa es clave para garantizar un producto con

durabilidad adecuada, bajo contenido de cenizas y alto poder calorífico.

En este contexto, el presente proyecto se orienta al aprovechamiento del lirio acuático seco, una planta acuática invasora que prolifera en cuerpos de agua dulce, y del aserrín de pino, un residuo abundante de la industria forestal. Ambos materiales fueron empleados como materia prima para la elaboración de pellets, utilizando almidón de maíz como aglutinante natural. El objetivo principal fue evaluar propiedades físicas y energéticas de las mezclas obtenidas, con el fin de determinar su viabilidad como biocombustible y contribuir al aprovechamiento sostenible de residuos orgánicos.

METODOLOGÍA

Obtención y preparación de materia prima

Para la presente investigación se recolectó la materia prima de lirio acuático en la zona de humedales artificiales del Instituto Tecnológico Superior de Xalapa de la carrera de Ingeniería Bioquímica, los cuales fueron seleccionados aleatoriamente sin importar su tamaño y peso. En cuanto a la materia prima del aserrín de pino, se obtuvo de una

carpintería ubicada en la Av. Ciudad de las flores, Colonia Revolución, C.P. 91100 de la Ciudad de Xalapa-Enríquez, Ver.

Recolectada la materia prima, los lirios acuáticos llevaron un proceso de secado puestos directo al sol, lo cual tardó 15 días. El aserrín de pino se llevó a un proceso de tamizado para eliminar impurezas y obtener un tamaño de partícula homogéneo (3 mm de diámetro).

Después de recolectar la biomasa, se preparó para su integración. Se molió el lirio acuático seco con un molino eléctrico de la marca KRUPS para obtener partículas finas y uniformes, mejorando la homogeneidad de la mezcla y facilitando su compactación; tamizando el lirio molido para eliminar impurezas y fragmentos grandes, asegurando una biomasa limpia y adecuada para su resguardo. Luego, se almacenó la materia en un recipiente plástico con tapa para protegerla de la humedad y evitar pérdidas.

Diseño de experimentos para la elaboración de pellets

Para la elaboración de los pellets a evaluar, se realizó un Diseño de mezclas, analizando cómo las proporciones de materiales y aglutinante afectan la calidad física y consistencia del producto. Se usó un 10% de aglutinante, fécula de maíz, por sus propiedades cohesivas. En la Tabla 1, se muestran los experimentos realizados.

Se elaboraron y caracterizaron los pellets determinando los porcentajes de biomasa de aserrín, lirio y aglutinante con una balanza analítica marca Chyo JK-180. Las mezclas se colocaron en una bandeja de aluminio y se comprimieron para formar los pellets. Se utilizó un dispositivo de compresión con orificios internos que permitieron la salida de líquido y mejoraron el soporte estructural.

Experimento	% Lirio	% Aserrín	% Aglutinante	Lirio (g)	Aserrín (g)	Aglutinante (g)
1	90%	0	10%	4.50	0	0.5
2	0	90%	10%	0	4.50	0.5
3	72%	18%	10%	3.60	0.90	0.5
4	63%	27%	10%	3.15	1.35	0.5
5	45%	45%	10%	2.25	2.25	0.5
6	27%	63%	10%	1.35	3.15	0.5
7	18%	72%	10%	0.90	3.60	0.5
8	78%	12%	10%	3.90	0.60	0.5
9	12%	78%	10%	0.60	3.90	0.5

Tabla 1. Diseño de experimentos

Caracterización fisicoquímica de la biomasa de humedales y residuos de madera

Contenido de humedad

Se utilizaron crisoles a peso constante, para lo cual se colocaron en una mufla marca SNOL a $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 30 minutos. Para reducir su temperatura se colocaron en un horno de secado BINDER a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 20 minutos. Posteriormente se sacaron y colocaron durante 15 minutos en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiental y se colocaron repetidamente en la balanza analítica para registrar su peso hasta que éste no variara en un valor de 0.005 g.

En cada crisol previamente tarado se colocó una muestra de 2 g de pellets para introducirlos en el horno de secado durante 2 h a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, se retiraron y colocaron en un desecador durante 15 minutos para enfriarse a temperatura ambiente, y una vez alcanzada, se registró su peso obtenido por medio la balanza analítica para aplicar la ecuación 1, correspondiente a cada experimento.

$$\% \text{ de humedad} = \frac{P_i - P_s}{P_i} \times 100$$

Ecuación 1. Donde:

% de humedad = Porcentaje de humedad

P_i = Peso inicial

P_s = Peso seco

Densidad

Se calcularon tres tipos de densidad: la densidad relativa, densidad básica y densidad nominal anhidra.

Densidad relativa

Se pesaron 2 g de muestra de pellets (peso inicial = P_i) y se colocaron en cajas Petri con 20 mL de agua para medir el volumen verde (V_v) por medio del incremento del nivel de agua en las cajas y se sustituyeron los valores en la ecuación 2.

$$D_r = \frac{P_i}{V_v}$$

Ecuación 2. Donde:

D_r = Densidad relativa

P_i = Peso inicial

V_v = Volumen verde

Densidad básica

Se utilizó el peso anhidro (P_A) obtenido tras la prueba de contenido de humedad y el volumen verde (V_v) para sustituirlos en la ecuación 3.

$$D_b = \frac{P_A}{V_v}$$

Ecuación 3. Donde:

D_b = Densidad básica

P_A = Peso anhidro

V_v = Volumen verde

Densidad nominal anhidra

Se consideraron el peso anhidro (P_A) y el volumen anhidro (V_A) y se sustituyeron en la ecuación 5. El volumen anhidro fue calculado aplicando la fórmula estándar para el volumen de un cilindro que se presenta en la ecuación 4. Este valor se utilizó en la fórmula de densidad nominal anhidra, proporcionando información sobre la compacidad del pellet una vez eliminado el contenido de humedad.

$$V = \pi r^2 h$$

Ecuación 4. Donde:

V = Volumen

r = Radio

h = Altura

$$D_n = \frac{P_A}{V_A}$$

Ecuación 5. Donde:

D_n = Densidad nominal anhidra

P_A = Peso anhidro

V_A = Volumen anhidro

Determinación del contenido de cenizas

Se colocaron 2 g de muestra de biomasa en un crisol tarado, del cual se había obtenido previamente el peso constante (con la misma metodología para la determinación de contenido humedad) para ser sometida a un proceso de combustión en una parrilla eléctrica hasta observar que cesara la emisión de humo, con el propósito de facilitar su posterior calcinación.

Las muestras se introdujeron en la mufla a una temperatura de $550 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 4 horas, conforme a lo establecido en por la norma ASTM D-7582 (2012). Una vez transcurrido este tiempo, se colocaron en una estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 20

minutos para reducir su temperatura y se procedió a enfriar en un desecador durante 15 minutos hasta alcanzar temperatura ambiente. Se realizó un nuevo pesaje en la balanza analítica y se obtuvo el peso final del residuo inorgánico para calcular el contenido de cenizas mediante la ecuación 6.

$$\%C_c = \frac{P_{cenizas}}{P_{seco}} \times 100$$

Ecuación 6. Donde:

$\%C_c$ = Porcentaje de contenido de cenizas

$P_{cenizas}$ = Peso de cenizas

P_{seco} = Peso seco

Determinación del poder calorífico teórico

Para realizar el cálculo se investigó el contenido de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N) y azufre (S) de las dos materias primas principales (madera de pino y la biomasa de lirio acuático).

Según Channiwala y Parikh (2002) para medir de manera individual el poder calorífico del lirio acuático y madera de pino, se puede emplear la ecuación 7.

$$PCI = 0.3491(C) + 1.1783(H) - 0.1034(O) - 0.0151(N) - 0.0211(S) + 0.1005$$

Ecuación 7. Donde:

PCI= Poder calorífico

C= Cantidad de carbono

H= Cantidad de hidrógeno

O= Cantidad de oxígeno

N= Cantidad de nitrógeno

S= Cantidad de azufre

Para poder calcularlo en una mezcla se debe utilizar la ecuación 8.

$$PCI = (\%A \times PCI_A) + (\%B \times PCI_B)$$

Ecuación 8. Donde: %A, %B = son las proporciones de cada biomasa en la mezcla (en decimales y no en porcentajes). PCI_A , PCI_B = son el poder calorífico de cada componente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras el secado del lirio acuático, se observó una importante disminución en el peso. Los lirios frescos presentaron pesos entre 208 g y 478 g, mientras que, después del secado, su peso se redujo considerablemente entre 12.6 g y 33.8 g. Este resultado confirma el alto contenido de humedad de esta biomasa vegetal (90% y 94%). La pérdida de peso es coherente con las características del lirio

acuático, conocido por su alta capacidad de retención de agua debido a su estructura esponjosa (90%-95%) (Duan et al., 2011).

Se obtuvo un total de 62.116 g de biomasa para la elaboración de los pellets. El proceso permitió obtener una biomasa con tamaño de partícula homogéneo y libre de contaminantes, aspecto esencial para garantizar la calidad final de los pellets. Además, la preparación adecuada favorece la eficiencia en la compactación y mejora las propiedades físicas del producto.

En cuanto al contenido de humedad se observó que todas las muestras presentaron valores inferiores al 12% que es el valor recomendado para pellets de biomasa (Demirbas, 2004). La muestra con el menor contenido de humedad (8,1192%) corresponde al experimento 9 con una proporción de 90% aserrín y 10% lirio, concordando con Duan et al. (2011) respecto a la baja relación de humedad del aserrín. Estos resultados confirman que las condiciones de secado y almacenamiento fueron efectivas. El bajo contenido de humedad favorece la conservación del pellet y su eficiencia energética durante la

combustión, evitando pérdidas de calor por evaporación de agua (Demirbas, 2004).

De manera general, respecto a la densidad relativa, básica y nominal anhidra se observó que las formulaciones con mayor proporción de aserrín presentaron los valores más altos en todos los tres tipos, mientras que las muestras con mayor contenido de lirio acuático mostraron ligeras disminuciones, debido a su naturaleza más porosa.

Para la densidad relativa se identificaron los valores correspondientes de cada formulación y los resultados evidencian que las mezclas con mayor proporción de aserrín presentan los valores más altos, lo cual se traduce en una mejor calidad física del pellet. Las muestras mostraron densidades relativas entre $1.2593 \frac{g}{cm^3}$ y $1.2788 \frac{g}{cm^3}$, lo que indicó una adecuada compactación de la biomasa en los pellets, reforzando la influencia positiva del aserrín en esta propiedad.

La muestra que alcanzó el mayor valor de densidad relativa es la que corresponde al experimento 4, con un valor de $1.2788 \frac{g}{cm^3}$, asociada a la formulación de 70% lirio y 30% aserrín. Esto sugiere que la

proporción de aserrín fue suficiente para aportar estabilidad y cohesión a la estructura del biocombustible. Lo anterior concuerda con lo señalado por Demirbas (2004), quien indicó que el aserrín aporta cohesión y compacidad, incrementando la densidad del pellet, mientras que el lirio tiende a reducir este valor debido a su estructura menos densa.

En la determinación de densidad básica se observaron resultados semejantes a los obtenidos en la densidad relativa, lo que confirma la adecuada compactación de las muestras. Las muestras presentaron valores de densidad básica entre $1.1254 \frac{g}{cm^3}$ y $1.2094 \frac{g}{cm^3}$. El valor más bajo corresponde al experimento 4 con una formulación 70% lirio acuático y 30% aserrín, mientras que el mayor valor se observó en el experimento 9, con una mezcla de 90% aserrín y 10% lirio. Las formulaciones con mayor proporción de aserrín presentaron valores más elevados, mientras que las de mayor contenido de lirio acuático muestran valores ligeramente inferiores. Este comportamiento reafirma que el aserrín mejora la compactación física

del pellet, incrementando su resistencia y eficiencia durante su manejo (Demirbas, 2004).

En relación con la densidad nominal anhidra, los datos obtenidos demostraron que los valores observados coinciden con los obtenidos en la densidad relativa y densidad básica, confirmando la consistencia en la compactación. La densidad nominal anhidra presentó valores entre $0.7642 \frac{g}{cm^3}$ y $0.8213 \frac{g}{cm^3}$, correspondientes a los experimentos 4 y 9 respectivamente. Estos resultados reafirman la influencia del aserrín en la mejora de la densidad del pellet. La variación en la densidad nominal anhidra de las formulaciones se muestra mediante un gráfico radial (Figura 1) que permitió identificar las diferencias entre las muestras de forma más clara.

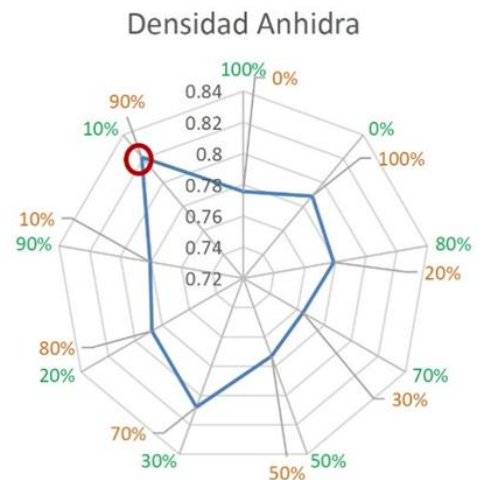


Figura 1. Gráfico densidad nominal anhidra. El color naranja corresponde a la biomasa de aserrín, mientras que el verde al lirio acuático. Fuente: Elaboración propia.

El círculo rojo indica que la formulación con un 90% de aserrín y un 10% de lirio acuático presentó mayor densidad anhidra y se evidencia una disminución de esta al aumentar la proporción de lirio acuático en los experimentos. Las formulaciones con mayor contenido de aserrín mantienen valores superiores, lo que indica su mayor capacidad de compactación incluso en condiciones de ausencia de humedad.

Al eliminar completamente la humedad, los experimentos con mayor contenido de lirio acuático presentaron menor densidad debido a su naturaleza porosa (Duan et al., 2011), mientras que el aserrín conservó su compacidad estructural.

Los resultados del contenido de cenizas mostraron una variación considerable entre las diferentes formulaciones. Las muestras con mayor proporción de lirio acuático como el experimento 1, presentaron los niveles más altos de cenizas (14.0565%), mientras que la muestra con el menor contenido de cenizas (0.4680%) correspondiente al experimento 2 con un contenido de aserrín del 100%, lo que

confirma la influencia positiva de este material para reducir la generación de residuos inorgánicos durante la combustión. La mezcla 50% aserrín y 50% lirio tuvo un contenido de cenizas de 6.1312%, menor que las formulaciones con más lirio acuático. A mayor proporción de lirio acuático, mayor porcentaje de cenizas tras la combustión. De acuerdo con lo anterior, el lirio acuático como biomasa genera más residuos tras la combustión por su alto contenido mineral (Duan et al., 2011), afectando la limpieza y eficiencia de los sistemas. Las formulaciones con aserrín producen pellets con menos residuo inorgánico.

Para estimar el poder calorífico teórico de las mezclas realizadas, se consideró la composición química de las materias primas. De acuerdo con los estudios de Duan et al. (2001) y Demirbas (2004), el lirio acuático seco contiene aproximadamente de 38.5% de carbono, 5.2% de hidrógeno, 50.5% de oxígeno, 1.2% de nitrógeno y 0.1% de azufre. Por su parte, el aserrín de pino presenta un 50% de carbono, 6% de hidrógeno, 42.2% de oxígeno, 0.3% de nitrógeno y 0.05% de azufre.

Utilizando la fórmula de Channiwala & Parikh (2002), el poder calorífico teórico para el lirio acuático se calculó en 14.43 MJ/kg, mientras que para el aserrín de pino fue de 20.23 MJ/kg. Estas cifras reflejan diferencias esperadas debido a la mayor concentración de carbono presente en el aserrín, lo cual favorece la generación de energía. En contraste, el lirio contiene una mayor proporción de oxígeno, lo que reduce su poder calorífico.

El valor más alto alcanzado por una mezcla fue de 19.36 MJ/kg correspondiente al experimento 9, donde es mayor la proporción de aserrín, mientras que aquellas con mayor presencia de lirio acuático se ubicaron en torno a los 15.24 MJ/kg (experimento 8).

En las mezclas equilibradas, el poder calorífico se mantuvo con valores intermedios (15.76-18.84 MJ/kg), lo que permitió inferir que ajustar las proporciones de ambas biomásas ofrece flexibilidad para adecuar el producto a distintas necesidades energéticas.

El experimento 5, con 50% aserrín y 50% lirio, tuvo un poder calorífico de 17.30 MJ/kg, mayor que los experimentos con más lirio acuático. Esto demostró

que el aserrín mejora el aporte energético del biocombustible incluso en proporciones intermedias. El aserrín de pino, por su naturaleza lignocelulósica y mayor contenido de carbono, aumenta significativamente el poder calorífico de las mezclas al proporcionar más energía durante la combustión (Demirbas, 2004). El lirio acuático, en cambio, sirve principalmente como material complementario en volumen, aunque reduce ligeramente la eficiencia térmica del pellet. Todos los experimentos evaluados mostraron valores dentro del rango aceptable para biocombustible sólido, confirmando la viabilidad de estos residuos como fuente alternativa de energía renovable.

CONCLUSIONES

La combinación del lirio acuático y aserrín de pino demostró ser una alternativa viable para la elaboración de biocombustibles sólidos, al aprovechar dos materiales abundantes y de bajo costo con un enfoque sostenible. El proyecto permitió comprobar que el uso de almidón de maíz como aglutinante natural mejora significativamente

la cohesión y estabilidad estructural de los pellets, sin afectar negativamente su comportamiento térmico.

La mayoría de los experimentos evaluados mostraron valores dentro del rango aceptable para su uso como biocombustible sólido, con poder calorífico entre 16 y 20 MJ/kg, conforme a los criterios establecidos por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, 2022), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2021), la Asociación Europea de la Biomasa (AEBIOM, 2021) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2022). Asimismo, se registraron contenidos de humedad inferiores al 12% y densidad adecuadas, lo que respalda la viabilidad del aprovechamiento conjunto de estos residuos como fuente alternativa de energía renovable. No obstante, en cuanto al contenido de cenizas, casi todas las formulaciones superaron el 1%, a excepción del pellet compuesto exclusivamente por aserrín.

De acuerdo con lo anterior, la utilización de biomásas de distinta procedencia, como el lirio

acuático y los residuos de madera de pino, resulta factible para la producción de pellets. Este tipo de iniciativas posee un gran potencial para generar impactos positivos en comunidades donde el lirio acuático representa un problema ambiental. Simultáneamente, se promueven alternativas energéticas accesibles y sustentables.

BIBLIOGRAFÍA

American Society for Testing and Materials. (2012). Standard test methods for proximate analysis of coal and coke by macro thermogravimetric analysis (ASTM D7582-12).

<https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D7582-12.htm>

Bioenergy Europe. (2022). *Statistical report: Pellet market overview*.

<https://bioenergyeurope.org>

Channiwala, S. A., & Parikh, P. P. (2002). A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel*, 81(8), 1051–1063. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00131-4)

Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.10.004>

Duan, N., Dong, B., Dai, L., & Dai, X. (2011). Characterization of water hyacinth biomass as raw material for anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 2003–2008. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.020>

European Biomass Association (AEBIOM). (2021). *Annual statistical report 2021*. <https://www.bioenergyeurope.org>

European Environment Agency (EEA). (2022). *Water pollution in Europe*. <https://www.eea.europa.eu>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). *The state of the world's forests*. <https://www.fao.org/state-of-forests/en/>

International Energy Agency (IEA). (2023). *Renewables 2023 report*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>

Loo, S. V., & Koppejan, J. (2008). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Earthscan.

Pradhan, P., Mahajani, S. M., & Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, 181, 215–232. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.002>

United Nations Environment Programme (UNEP). (2022). *Biogas: A clean cooking fuel*. <https://www.unep.org>