



# REVALORIZACIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS PARA LA PRODUCCIÓN DE PELLETS COMBUSTIBLES EN EL ESTADO DE QUERÉTARO

# REVALUATION OF AGRICULTURAL RESIDUES FOR THE PRODUCTION OF FUEL PELLETS IN THE STATE OF QUERÉTARO

Silva-Hernández Cinthia Alejandra <sup>1</sup>, Gutiérrez-Antonio Claudia <sup>2</sup>\*, García-Trejo Juan Fernando <sup>1</sup>, Feregrino-Pérez Ana Angélica <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro Cerro de las Campanas S/N Col. Las Campanas. Querétaro, México.

<sup>2</sup> Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro Cerro de las Campanas S/N Col. Las Campanas. Querétaro, México.

\* Autor de correspondencia, correo: [claudia.gutierrez@uaq.mx](mailto:claudia.gutierrez@uaq.mx)

## Resumen

En las últimas décadas, la demanda de energía ha crecido proporcionalmente con la población mundial; dicha energía se genera a partir de recursos no renovables, como el petróleo, el carbón y el gas natural. El uso de estos combustibles no renovables genera altas cantidades de gases de efecto invernadero y partículas que son emitidas al ambiente, cuyas concentraciones ponen en riesgo la salud humana. En la búsqueda de nuevas alternativas tecnológicas para la producción de energía renovable se descubrió el potencial de la biomasa. La biomasa puede convertirse en biocombustibles líquidos, gaseosos y sólidos; de estos últimos, los pellets combustibles son los más populares. Los pellets combustibles son cilindros de biomasa comprimida, que pueden emplearse para producir energía eléctrica, calorífica e inclusive otros biocombustibles. Los pellets combustibles pueden elaborarse a partir de residuos agroindustriales, razón por la cual se han convertido en una alternativa de bajo costo para la generación de energía. Así, en el presente artículo se presentará información sobre los pellets combustibles, su proceso de producción, las distintas biomásas que pueden usarse para producirlo, así como su potencial para producir energía mediante la revalorización de residuos agrícolas del estado de Querétaro.

Palabras clave: *Biocombustibles, bioenergía, biomasa residual, combustibles sólidos, pellets combustibles.*

## Abstract

*In the last few decades, the demand for energy has grown proportionally with the world population; this energy is produced from non-renewable resources, such as oil, coal, and natural gas. The use of these non-renewable fuels generates high amounts of greenhouse gases and particles that are emitted into the environment, in concentrations that affects human health. In the search for new technological alternatives for the production of renewable energy, the potential of biomass was discovered. Biomass can be converted into liquid, gaseous and solid biofuels; among solid biofuels, fuel pellets are the most popular. Fuel pellets are cylinders of compressed biomass, which can be employed to produce electrical energy, heat and even other biofuels. Fuel pellets can be produced from agro-industrial waste, and due to this they have become a low-cost alternative for power generation. Thus, this article will present information on fuel pellets, their production process, the different biomasses that can be used to produce them, as well as their potential to produce energy through the revaluation of agricultural residues in the state of Querétaro.*

Keywords: *Biofuels, bioenergy, residual biomass, solid fuels, fuel pellets.*

## 1. Introducción

En las últimas décadas, la demanda de energía ha crecido proporcionalmente con el incremento de la población mundial. En el año 2019 se produjeron 580,495 PJ (EIA, 2019a), cantidad de energía que equivale a 16,690 millones de litros de gasolina. No obstante, la energía producida fue insuficiente para satisfacer las necesidades de toda la población mundial, ya que 850 millones de personas no contaron con el servicio de energía eléctrica (EIA, 2019b). Adicionalmente, la Agencia Internacional de Energía prevé que el consumo global de energía crecerá en casi 50% para el año 2050 (EIA, 2019c), lo que se traduce en un incremento significativo en el consumo de recursos para satisfacer estas necesidades.

A nivel mundial, para suministrar la energía se ha recurrido principalmente a recursos no renovables, como petróleo, carbón y gas natural; aproximadamente 81.7% de la energía global se satisface a partir de estas fuentes (Martínez-Guido y col., 2019). Sin embargo, los recursos no renovables serán cada vez más escasos, y debido a su localización sus procesos de extracción serán cada vez más costosos. Por otro lado, la quema de estos combustibles genera altas cantidades de emisiones al ambiente (NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>) (Martínez-Guido y col., 2019), las cuales ponen en riesgo la salud humana y comprometen el futuro de todas las generaciones. La Organización Mundial de la Salud estima que cerca de siete millones de personas mueren cada año por la exposición a aire contaminado, cuyo principal contribuyente es la quema de combustibles fósiles (WHO, 2018); en especial, las partículas finas penetran profundamente en los pulmones y el sistema cardiovascular, provocando accidentes cerebrovasculares, cardiopatías, cáncer de pulmón, neumopatías obstructivas crónicas, e infecciones respiratorias (WHO, 2018). De manera particular en el estado de Querétaro, de acuerdo al Centro de Monitoreo de la Calidad del Aire (2020) el material particulado presente en el aire tiene diámetros menores o iguales a 2.5 y 10 micrómetros (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, respectivamente). Por ello, se han buscado nuevas alternativas tecnológicas para la producción de energía a partir de recursos renovables, siendo la biomasa uno de los más atractivos. La biomasa es todo el material de origen biológico que se genera en el ciclo corto de carbono excluyendo al que, incrustado en formaciones geológicas, es transformado

en fósiles (FAO, 2019). Históricamente, la biomasa ha sido empleada como combustible, mediante su quema directa para la obtención de energía calorífica. Una de las ventajas más importantes de la biomasa es que su uso como combustible es neutral en carbono; es decir, el carbono liberado en la combustión es el mismo que se absorbe en el crecimiento de la biomasa (Gupta y Gaur, 2019). Por otra parte, su uso directo como combustible tiene desventajas, como los elevados costos de transporte y baja eficiencia en la combustión debido a su baja densidad y estado físico no homogéneo. Sin embargo, la biomasa se puede convertir, mediante diversos procesos, en biocombustibles sólidos, líquidos o gaseosos; esta conversión permite eliminar las desventajas anteriormente mencionadas.

Los biocombustibles líquidos incluyen el diésel verde y la bioturbosina, mientras que el biogás y el syngas son biocombustibles gaseosos; los biocombustibles sólidos comprenden los pellets combustibles y las briquetas (Guo y col., 2015). Los procesos de producción de biocombustibles son bioquímicos, termoquímicos y mecánicos. Dentro de los diferentes tipos de biomasa, los residuos de actividades forestales, agrícolas e industriales resultan muy atractivos, puesto que al ser un desecho su costo es bajo, o incluso nulo, y se generan en grandes cantidades. En su mayoría, este tipo de residuos son materiales lignocelulósicos, y algunos pueden contener lípidos, azúcares o almidones; no obstante, sin importar su composición dichos residuos pueden convertirse en biocombustibles. Así, la revalorización de este tipo de residuos permite generar nuevas alternativas energéticas de baja huella de carbono, mitigar el impacto que los residuos causan al medio ambiente, y beneficiar a la sociedad debido a la creación de nuevas fuentes de empleo.

En particular, los biocombustibles sólidos han capturado la atención de la comunidad científica debido a que pueden ser empleados para generar energía eléctrica y/o calorífica, o inclusive otros biocombustibles. Dentro de los biocombustibles sólidos, los pellets combustibles son los más populares, debido a su fácil manejo, y a que fluyen fácilmente para el transporte masivo y el embalaje debido a sus dimensiones (Hay, 2015). Los pellets combustibles son pequeños cilindros de biomasa comprimida. Figura 1. Los pellets combustibles tienen una mayor densidad que la biomasa en su estado original; gracias a ello es más fácil

y económico tanto su manejo como su almacenamiento y transporte, en comparación con la biomasa en su estado original.



Figura 1. Pellets combustibles de madera.

Los pellets combustibles tienen una amplia variedad de aplicaciones, desde estufas residenciales hasta plantas de energía a gran escala. Los pellets combustibles que cumplen con los estándares de calidad se pueden adoptar fácilmente en cualquier dispositivo de conversión de biomasa, tales como calderas residenciales, estufas residenciales, gasificadores, y calderas industriales [Pradhan y col., 2018].

Por lo anteriormente expuesto, los pellets combustibles se han convertido en una alternativa renovable y de bajo costo para la generación de energía. Por ello, en el presente artículo se presentará información sobre los pellets combustibles, su proceso de producción, las distintas biomásas que pueden usarse para producirlos, así como su potencial para producir energía mediante la revalorización de residuos agrícolas del estado de Querétaro.

## 2. Pellets combustibles

Según la norma internacional ISO 17225, los pellets combustibles son biocombustibles densificados hechos de biomasa triturada o molida con o sin aditivos y unida como cilindros, generalmente de diámetro < 25 mm, longitud aleatoria y típicamente de 3.15 mm a 40 mm con extremos rotos, obtenidos por compresión mecánica (ISO, 2014). Los pellets combustibles se pueden producir a partir de madera, residuos leñosos y residuos no leñosos.

En particular, la biomasa residual ha sido de gran interés para la producción de pellets combustibles, dado que permite resolver un problema de contaminación al mismo tiempo que se genera una solución energética.

La biomasa residual se genera como resultado de las actividades tanto domésticas como productivas, y abarca residuos agrícolas, agroindustriales, forestales, animales y orgánicos urbanos, como está ejemplificado en la Figura 2.

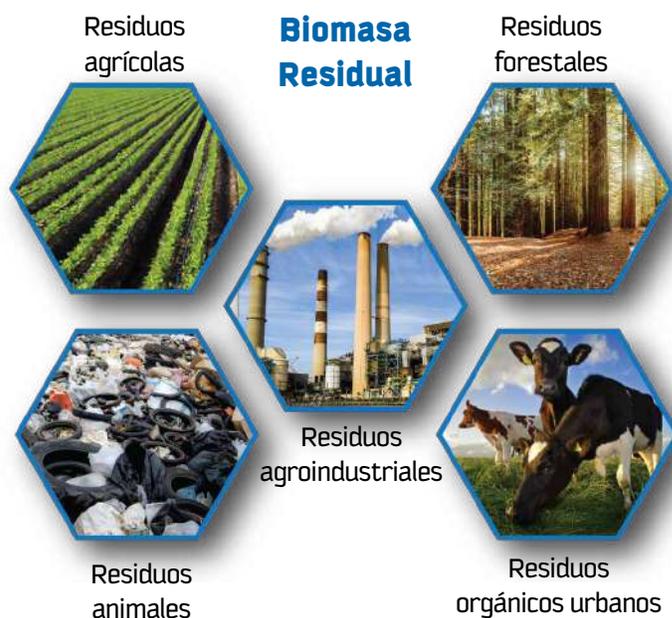


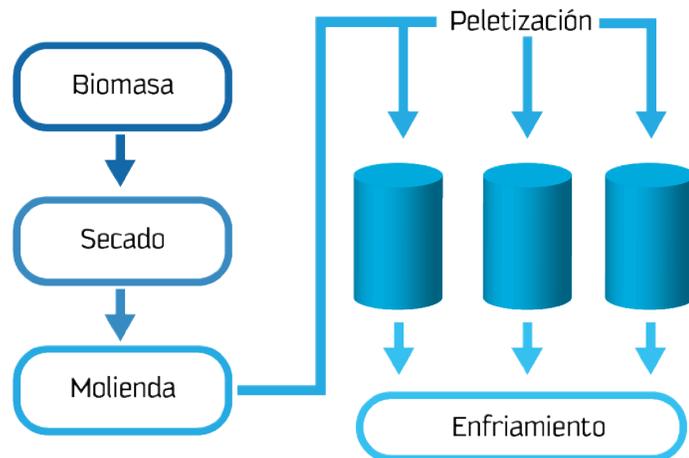
Figura 2. Fuentes de biomasa residual.

En México, se cultivan una gran cantidad de productos que incluyen frutas, verduras, tubérculos y vainas, semillas, raíces y hojas; algunos productos son comercializados en fresco y otros son transformados en harinas, aceites, néctares, jugos, vinos, mermeladas, ensaladas, concentrados en polvo, entre otros. Durante su procesamiento hay una considerable generación de residuos, desde la cosecha misma, incluyendo los centros de concentración y distribución, y finalizando en la industrialización, comercialización y consumo. Así, en la cosecha de cultivos se generan como residuos primarios hojas y tallos del maíz, tallos y vaina de sorgo, puntas y hojas de caña de azúcar, paja de trigo, paja de cebada y de frijol, así como cáscara de algodón. De la post-cosecha se generan residuos secundarios obtenidos del procesamiento entre los que están el bagazo de caña de azúcar, mazorcas y olotes, bagazo de maguey o agave,

así como pulpa de café; en la elaboración de productos como néctares, zumos y mermeladas únicamente se utiliza la pulpa y se desecha aproximadamente el 50 % del fruto [Piña-Guzmán y col., 2017]. Por otra parte, también existe un enorme potencial para la creación de industrias bioenergéticas a partir de residuos de biomasa forestal, ya que la industria forestal es una actividad de relevancia económica en el país. Una parte significativa de la biomasa forestal (ramas y puntas de los árboles) por lo general no se recupera, ya que no se puede convertir fácilmente en productos utilizables como la madera aserrada; usualmente estos residuos son triturados y esparcidos en los terrenos, sin ningún uso adicional. Tan sólo en la región de Pueblo Nuevo, Durango se determinó que la cantidad de residuos recuperables asciende a casi 31 ton de biomasa por año [Villega-Suárez y col., 2018]. Las biomásas mencionadas anteriormente pueden emplearse para la producción de pellets combustibles, mediante el proceso que se describe en la siguiente sección.

### 3. Proceso de producción de pellets

La producción de pellets combustibles consiste básicamente en cuatro etapas: secado, molienda, densificación (peletización) y enfriamiento, Figura 3.



**Figura 3.** Diagrama de producción de pellets. Adaptado de Uslu y col. [2008].

Como primera etapa, en el secado se busca que la biomasa tenga un contenido de humedad óptimo para generar pellets con un contenido de energía lo más cercano posible al de pellets de madera (16.5 GJ/ton), que se considera el valor de referencia [Whittaker and Shield, 2016]; el contenido

óptimo de humedad usualmente se encuentra en el rango es de 5-28%. Una vez que el contenido de humedad es el apropiado se procede a la molienda de la biomasa, cuyo objetivo es tener el tamaño de partícula adecuado para la peletización; si el tamaño es muy grande no se logra una buena densificación, y si es muy pequeño el consumo de energía se incrementa de manera significativa. Por ello, los valores óptimos de humedad y tamaño de partícula deben determinarse para cada biomasa, ya que su composición y textura varía de forma considerable [Pradhan y col., 2018]. Una vez que la biomasa está seca y molida se puede densificar mediante una peletizadora, la cual consiste básicamente en una serie de rodillos que comprimen la materia prima a través de una matriz de acero perforada. Al pasar la biomasa a través de los canales de prensa cilíndricos de la matriz perforada se produce sobrecalentamiento, debido a la fricción entre el material de biomasa y las paredes de la peletizadora. Gracias a la presión ejercida por los rodillos y al calentamiento por fricción se obtienen cilindros de biomasa comprimida (pellets). La importancia del enfriado radica en que los pellets producidos se endurecen al enfriarse, lo que mejora la resistencia y la densidad de los pellets [Mostafa y col., 2019].

El tipo, composición química, contenido de humedad y tamaño de partícula de la biomasa tienen un efecto sobre la calidad de los pellets producidos así como en sus emisiones. Los componentes de unión natural como hemicelulosas, celulosa, lignina, almidón, proteínas y carbohidratos solubles en agua que se encuentran en la biomasa juegan un papel importante, con respecto a las propiedades físicas de los pellets producidos [Mostafa y col., 2019]. Estos aglutinantes naturales son la causa principal de los puentes sólidos que crean enlaces entre partículas. El contenido de humedad de la biomasa también es importante, debido a que actúa como lubricante y aumenta el área de contacto de las partículas; así, el agua es un aglutinante tipo película con enlaces de hidrógeno. Adicionalmente la desnaturalización de las proteínas, la gelatinización del almidón, el ablandamiento térmico de la biomasa y la recristalización de los carbohidratos cambian al aumentar la temperatura en presencia de agua [Mostafa y col., 2019]. Durante la densificación, los enlaces de hidrógeno y las fuerzas de van der Waals son las fuerzas de atracción intermoleculares más comunes; estas fuerzas disminuyen su valor al aumentar el tamaño de partícula [Mostafa y col., 2019]. Cabe mencionar que debido al manejo mecánico de los pellets durante la

producción, el transporte y el almacenamiento se forma un polvo fino, que genera riesgos de incendio. Estos polvos finos también afectan negativamente el proceso del sistema de alimentación automática, y la alta temperatura resultante de su rápida combustión propicia la fusión de las cenizas (Oberberger y Thek, 2010).

Debido a lo anteriormente expuesto, se han propuesto estándares que proporcionan valores claros y específicos de diferentes parámetros que se deben seguir, para así obtener pellets de alta calidad. El Comité Europeo de Normalización (CEN) desarrolló estándares para biocombustibles sólidos. Por ejemplo, la norma europea EN 14961-1 para uso general que incluye pellets de diferentes materias primas de biomasa (EN, 2010), EN 14961-2 para pellets de madera para uso no industrial (EN, 2012a) y EN 14961-6 para pellets no leñosos para uso no industrial (EN, 2012b). Por otra parte, la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) tiene la norma ISO 17225-1 para requisitos generales (ISO, 2014b), ISO 17225-2 para pellets de madera clasificados para uso industrial y no industrial (ISO, 2014c) y ISO 17225-6 para pellets no leñosos (ISO, 2014d). La serie ISO 17225 ha reemplazado a EN 14961 para convertirse en el estándar nacional en Europa. La norma ISO 17225 establece los parámetros que los pellets combustibles deben de cumplir en función del tipo de biomasa de la cual proceden, así como el uso de los biocombustibles. La norma ISO 17225-6 se enfoca en pellets combustibles elaborados a partir de biomasa no leñosas, las cuales incluyen biomasa herbácea, frutal, acuática, así como mezclas de biomasa (ISO, 2014d). Para este tipo de pellets, las especificaciones más importantes se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Especificaciones de pellets combustibles elaborados a partir de biomasa herbácea, frutal, acuática, así como de mezclas de biomasa (ISO, 2014d).

Propiedad	Valor
Longitud	Mayor a 3.15 mm Menor a 40 mm
Humedad	Menor a 15%
Cenizas	Menor al 10%
Durabilidad mecánica	Mayor o igual a 96%
Finos	Menor al 3%
Densidad	Mayor o igual a 600 kg/m <sup>3</sup>
Contenido de nitrógeno	Menor a 2% (peso en base seca)
Valor calorífico neto	14.56 MJ/kg

Las especificaciones que se presentan en la Tabla 1 aplican para los tipos de biomasa ahí indicados. No obstante, los parámetros cambian ligeramente si las biomasa son pajas de cereal, miscanto, y césped caña canaria, o bien son biomasa leñosas. Las variaciones en los parámetros obedecen a la naturaleza química de las biomasa empleadas como materias primas.

Los pellets combustibles deben cumplir alguno de los estándares anteriormente mencionados para poder comercializarse. El cumplimiento de dichos estándares garantiza que son un producto de calidad en términos del poder energético, durabilidad y emisiones liberadas durante su combustión. Otro aspecto importante es que garantiza que los pellets combustibles no dañarán los equipos en los cuales se empleen; esto permite promover su uso en diversas aplicaciones, algunas de las cuales se describen en la siguiente sección.

#### 4. Aplicaciones de los pellets combustibles

Los pellets se usan en una amplia variedad de dispositivos, desde hornos de pequeña escala con capacidades nominales de hasta 100 kWh, hornos de mediana escala con 100 a 1,000 kWh, hasta hornos de gran escala con capacidades nominales de más de 1,000 kWh (Oberberger y Thek, 2010). Los sistemas a pequeña escala incluyen hornos con una capacidad nominal de caldera de hasta 100 kWh. El mercado de estos sistemas de calentamiento de pellets está experimentando un crecimiento continuo en muchos países; por ejemplo, en Austria la producción de pellets se incrementó 278 veces en el período 1995-2009, mientras que en Alemania y Suecia las nuevas instalaciones han aumentado 14%-200% (1999-2010) y 2.1%-68% (1995-2010), respectivamente (Oberberger y Thek, 2010). Los sistemas a pequeña escala se usan en el sector de la calefacción residencial, como estufas individuales o sistemas de calefacción central, así como en microrejillas y sistemas industriales más pequeños. Por otra parte, los hornos con una capacidad nominal de caldera que varía de 100 a 1,000 kWh se designan de mediana escala. En general, tales hornos son sistemas de calefacción urbana de biomasa de tamaño mediano, con aplicaciones comerciales o industriales, así como sistemas de cogeneración de biomasa, en los cuales se obtiene simultáneamente energía eléctrica y térmica. Finalmente, los hornos a gran escala

tienen capacidades nominales de caldera de más de 1 MWth. Tales hornos se pueden encontrar, por ejemplo, en la industria de procesamiento de madera, en plantas de calefacción de distrito o en plantas de cogeneración. La utilización de pellets es posible en todo tipo de sistemas de cogeneración de biomasa, y destacan las turbinas de vapor así como el proceso del ciclo Rankine (Oberberger y Thek, 2010).

A nivel comercial, en 2011 la producción y el consumo de pellets alcanzaron el equilibrio después de que muchas plantas de energía eléctrica hicieron una transición total a la biomasa como combustible principal (Hernández y col., 2017). Este fue el caso de la central eléctrica de Tilbury en el Reino Unido, con una capacidad instalada cercana a 1.131 MW de potencia mediante el uso de pellets de biomasa al 100%; de igual manera, la planta Drax, también en el Reino Unido, promovió la construcción de una planta de 300 MW que utiliza 100% de pellets de biomasa (Hernández y col., 2017). En 2013, la producción mundial fue liderada por la Unión Europea y el Reino Unido con 12.2 millones de ton, alcanzando cerca del 50% del total producido, seguido por los Estados Unidos y Canadá con el 31%, China y Rusia con el 9% y 7%, respectivamente, y el resto del mundo con 4%, para un total de 24.5 millones de ton (Hernández y col., 2017). En comparación con la producción, el consumo fue de 23.2 millones de ton, de las cuales 18.3 millones se destinaron a Europa y el Reino Unido; lo anterior representa aproximadamente el 80% del consumo mundial de pellets, seguido de 2.7 millones de ton en los Estados Unidos y Canadá, 1 y 0.9 millones de ton en Rusia y Asia, respectivamente, y el resto del mundo con un consumo total de 0.3 millones de ton (Hernández y col., 2017). Para 2014, Suecia, Alemania y Letonia fueron los principales países productores de pellets de biomasa en Europa; estos tres países producen alrededor del 40% del total europeo (Hernández y col., 2017). En México pocos son los esfuerzos

que se han realizado referente de la comercialización de los pellets combustibles, liderados principalmente por el Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad y la Universidad Autónoma de Querétaro; no obstante, el potencial energético de los residuos en el país es significativo (Tauro y col., 2018) y podría detonar su revalorización mediante la implementación de la cadena de suministro de pellets combustibles (Martínez-Guido y col., 2019).

## 5. Estimación del potencial de producción de pellets en el estado de Querétaro

En México es posible reemplazar completamente la demanda de gas natural y el 73% de la demanda de gas LP usado en calefacción residencial y comercial mediante el uso de pellets combustibles; esta sustitución implicaría mitigar hasta el 18% de las emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de electricidad en México (Tauro y col., 2018). De manera particular, el estado de Querétaro destaca como una de las entidades líderes en el país en términos de productividad y competitividad, por lo que su consumo de energía es significativo. Al mismo tiempo, el gobierno ha impulsado iniciativas para la generación de energía a partir de fuentes renovables, principalmente tecnologías solares. No obstante, el estado cuenta con una cantidad considerable de residuos agrícolas que pueden emplearse para producir bioenergía. Por ello, a continuación, se presenta el estimado de satisfacción del consumo de energía eléctrica del estado, con base en el uso de pellets combustibles elaborados a partir de dichos residuos.

En 2018 el estado de Querétaro tuvo una producción agrícola de 2, 095, 276 ton de alimentos (SIAP, 2018) de diferentes cultivos enlistados en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Producción agrícola del estado de Querétaro en 2018, con estimaciones de producción de residuos y energía.

Cultivo	Producción (ton)	Cantidad estimada de residuos (ton)	Contenido energético estimado (MJ)
Aguacate	419.50	0.00	0.00
Ajo	878.72	96.66	1,339,213.22
Alcachofa	79.75	8.77	121,542.99
Alfalfa verde	553,441.68	60,878.58	843,472,792.40
Apio	6,200.00	682.00	9,449,110.00
Arvejón	4.80	0.53	7,315.44

Avena forrajera	127,161.96	13,987.82	193,801,185.14
Brócoli	10,054.37	1,105.98	15,323,362.60
Cacahuete	6.80	0.00	0.00
Café cereza	25.47	0.00	0.00
Calabacita	645.20	70.97	983,317.06
Camote	10.40	1.14	15,850.12
Cebada grano	28,749.10	24,436.74	371,047,384.24
Cebolla	11,761.50	1,293.77	17,925,114.08
Chía	76.80	65.28	991,211.52
Chile seco	215.10	23.66	327,823.16
Chile verde	36,282.41	3,991.07	55,296,206.96
Coliflor	3,974.04	437.14	6,056,635.66
Durazno	53.00	0.00	0.00
Elote	2,822.14	310.44	4,301,082.47
Espárrago	6,592.19	725.14	10,046,827.17
Espinaca	925.20	101.77	1,410,051.06
Frijol	4,678.65	3,976.85	60,384,528.36
Garbanzo forrajero	87.90	9.67	133,964.00
Garbanzo grano	5.30	4.51	68,403.92
Granada	11.20	0.00	0.00
Guayaba	303.00	0.00	0.00
Hongos setas y champiñones	3,470.00	381.70	5,288,453.50
Jícama	2,008.08	220.89	3,060,414.32
Lechuga	26,548.82	2,920.37	40,461,729.12
Limón	27.60	0.00	0.00
Maíz forrajero	752,423.10	82,766.54	1,146,730,425.56
Maíz grano	256,752.06	218,239.25	3,313,744,787.18
Mango	480.70	0.00	0.00
Manzana	659.66	0.00	0.00
Naranja	2,502.60	0.00	0.00
Nopalitos	1,445.40	173.45	2,180,241.36
Nuez	235.00	0.00	0.00
Pastos y praderas	18,681.42	2,054.96	28,471,418.15
Pepino	4,131.92	454.51	6,297,252.68
Pera	40.80	0.00	0.00
Sorgo forrajero	4,293.30	472.26	6,543,203.87
Sorgo grano	4,987.50	4,239.38	64,370,670.00
Jitomate	105,499.65	11,604.96	160,786,741.58
Tomate verde	17,862.30	1,964.85	27,223,038.32
Trigo grano	150.00	127.50	1,935,960.00
Triticale forrajero	73,365.00	8,070.15	111,811,928.25
Tuna	599.80	71.98	904,738.32
Uva	2,090.39	229.94	3,185,858.88
Zanahoria	21,555.50	2,371.11	32,851,659.78
<b>Total</b>	<b>2,095,276.78</b>	<b>448,572.27</b>	<b>6,548,351,442.41</b>

Considerando la producción agrícola generada se pueden estimar tanto la cantidad de residuos generados como su potencial energético, mediante los coeficientes reportados por el Atlas Nacional de Biomasa (ANBIO). En dicho Atlas se reportan los coeficientes para estimar los residuos a partir de la producción; por ejemplo, para granos y oleaginosas de 0.88, para hortalizas y tubérculos de 0.11, para frutales de 0, para nopales y tuna de 0.12 (ANBIO, 2018). Utilizando estos porcentajes se estimaron las toneladas de residuos agrícolas de cada cultivo, como se muestra en la columna de cantidad de residuos de la Tabla 2; entonces, en 2018 se estima que en el Estado se generaron en 448, 572 ton de residuos. Con base en los residuos estimados se emplean los coeficientes de poder calorífico inferior para calcular su potencial energético; así se consideran para granos y oleaginosas un coeficiente de 15.18 MJ/kg, para hortalizas y tubérculos de 13.88 MJ/kg, para nopales y tuna de 12.57 MJ/kg (ANBIO, 2018). Los resultados se pueden observar en la columna de contenido energético de la Tabla 2. Por lo que, si se hubiera convertido toda esta biomasa residual en pellets combustibles, éstos podrían aportar 6.54 PJ, equivalentes a 1,818.75 GWh; dicha cifra no considera pérdidas en el proceso de conversión. Como referencia, el estado de Querétaro consume 5,459 GWh (SIA, 2018), por lo tanto, en 2018 se pudo haber generado a partir de residuos agrícolas el 33% de la electricidad necesaria en el estado.

Respecto de la competitividad de los pellets combustibles hay pocos estudios a nivel mundial, y en México sólo hay uno (Tauro y cols., 2018). De acuerdo con Tauro y cols. (2018), los pellets de aserrín (7.2 USD/GJ) podrían ser competitivos con el gas natural (9.3 USD/GJ) en aplicaciones residenciales considerando una distancia de transporte no mayor a 720 km, y con gas LPG (16.2 USD/GJ) en distancias hasta de 2000 km. No obstante, estos pellets no son competitivos en los sectores comercial e industrial, ya que sus precios son mayores a los del carbón. Por ello, se recomienda la producción y uso de pellets combustibles por regiones, es decir como una solución local, dado que el costo de transporte y recolección pueden volver inviable la conversión tanto financiera como ambientalmente. Asimismo, debe mejorarse el proceso de producción de pellets combustibles para que los costos de producción sean menores, y así lograr que

estos biocombustibles sólidos sean competitivos también en aplicaciones comerciales e industriales. Adicionalmente de la producción de electricidad, los pellets también pueden usarse en el estado para la generación de energía térmica en aplicaciones como calentamiento residencial, uso industrial en calderas, hornos y estufas de pellets, calentamiento de invernaderos, etc.

## Conclusiones

El crecimiento poblacional ha originado un incremento en el consumo de energía, la cual en su mayoría se genera a partir de fuentes no renovables; el uso excesivo de estas fuentes ha causado problemas de contaminación ambiental y afectaciones a la salud humana. Por ello, es preciso buscar soluciones para satisfacer las necesidades energéticas con fuentes renovables y de menor impacto ambiental, que además sean competitivas económicamente. En este contexto, el uso de pellets combustibles, producidos a partir de biomasa residual, ofrece ventajas ambientales, como la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto a los combustibles fósiles, y socioeconómicas, como la diversificación energética y nuevas oportunidades para el sector agroindustrial. De manera particular, en el estado de Querétaro se pueden satisfacer parcialmente las necesidades energéticas, y al mismo tiempo resolver el problema de contaminación asociado con la generación de dichos residuos. La revalorización de dichos residuos también permitirá la creación de una nueva cadena de valor, que beneficie al sector agrícola.

## Agradecimientos

Se agradece al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca de manutención de Cinthia Alejandra Silva Hernández para la realización de sus estudios de posgrado.

## Referencias bibliográficas

ANBIO Atlas Nacional de Biomasa (2018). Coeficientes consultados en <https://dgel.energia.gob.mx/ANBIO/mapa.html?lang=es#tab-forestales>  
CEMCAQ Centro de Monitoreo de la Calidad del Aire del

- Estado de Querétaro (2020). Calidad del aire – Índice de aire y salud. <http://www.cemcaq.mx/reportes/calidad-del-aire-actual>
- EN Norma Europea (2010). 14961-1 Biocombustibles Sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 1: Requisitos Generales
- EN Norma Europea (2012a). 14961-2 Biocombustibles Sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Pellets de madera para uso no industrial.
- EN Norma Europea (2012b). 14961-6 Biocombustibles Sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 6: Pellets no leñosos para uso no industrial.
- FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). Consultado en <http://www.fao.org/energy/bioenergy/en/>
- García, C. A., Riegelhaupt, E., Ghilardi, A., Skutsch, M., Islas, J., Manzini, F., & Masera, O. (2015). Sustainable bioenergy options for Mexico: GHG mitigation and costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 545-552.
- Guo, M., Song, W., & Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 712-725.
- Gupta, D., Gaur, S.K. (2019). 19 - Carbon and biofuel footprinting of global production of biofuels, Editores: Deepak Verma, Elena Fortunati, Siddharth Jain, Xiaolei Zhang, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy, *Woodhead Publishing*, 449-481.
- Hay, F.J. (2015). Chapter 37 - Entrepreneurial Opportunities in Bioenergy, Editores: Anju Dahiya, Bioenergy, Academic Press, 565-577.
- Hernandez Solorzano, L. C., Forero Nuñez, C. A., & Sierra, F. E. (2017). Biomass densification: A review of the market and recent R&D trends. *TECCIENCIA*, 12(23), 81-92. doi:10.18180/tecciencia.2017.23.10
- IEA International Energy Agency. (2019a). Energy efficiency indicators 2019. Consultado en <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD&energy=Balances&year=2019>
- IEA International Energy Agency. (2019b). World Energy Outlook 2019. Consultado en <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- IEA International Energy Agency. (2019c). Share of global electricity demand growth to 2050. Consultado en <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-global-electricity-demand-growth-to-2050>
- ISO International Organization for Standardization. (2014a). 17225 Solid biofuels. Fuel specifications and classes
- ISO International Organization for Standardization. (2014b). 17225-1 Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 1: General requirements
- ISO International Organization for Standardization. (2014c). 17225-2 Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 2: Graded wood pellets
- ISO International Organization for Standardization. (2014d). 17225-6 Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 6: Graded non-woody pellets
- Martínez-Guido, S., Ríos-Badrán, I., Gutiérrez-Antonio, C., & Ponce-Ortega, J. (2019). Strategic planning for the use of waste biomass pellets in Mexican power plants. *Renewable Energy*, 130, 622-632
- Mostafa, M., Hu, S., Wang, Y., Su, S., Hu, X., Elsayed, S., & Xiang, J. (2019). The significance of pelletization operating conditions: An analysis of physical and mechanical characteristics as well as energy consumption of biomass pellets. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 105, 332-348. doi: 10.1016/j.rser.2019.01.053
- Obernberger, Ingwald & Thek, Gerold. (2010). The Pellet Handbook. The Production and Thermal Utilization of Pellets.
- Piña-Guzmán, A., Nieto-Monteros, D., & Robles-Martínez F. (2017). Utilización de residuos agrícolas y agroindustriales en el cultivo y producción del hongo comestible seta (*Pleurotus* spp.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32, 141-151.
- Pradhan, P., Mahajani, S. M., & Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, 181, 215-232.
- SIA Sistema de Información energética. Consumo consultado en [http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvequa=DIIIE\\_C32\\_ESP](http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvequa=DIIIE_C32_ESP)
- SIAP Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Estadística de la producción agrícola en 2018. Datos abiertos consultados en: <http://infosiap.siap.gob>

mx/gobmx/datosAbiertos.php

- Tauro, R., García, C. A., Skutsch, M., & Masera, O. (2018). The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 380-389
- Uicab-Brito, L. & Sandoval-Castro, Carlos. (2003). Uso del contenido ruminal y algunos residuos de la industria cárnica en la elaboración de composta. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 2. 45-63.
- Uslu, A., Faaij, A., & Bergman, P. (2008). Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. *Energy*, 33(8), 1206-1223.

- Villela-Suárez, Juan Martín, Aguirre-Calderón, Oscar Alberto, Treviño-Garza, Eduardo Javier, & Vargas-Larreta, Benedicto. (2018). Disponibilidad de residuos forestales y su potencial para la generación de energía en los bosques templados de El Salto, Durango. *Madera y bosques*, 24(3), e2431529
- WHO World Health Organization. (2018). How air pollution is destroying our health. Consultado en <https://www.who.int/airpollution/news-and-events/how-air-pollution-is-destroying-our-health>
- Whittaker, C., Shield, I. (2016). 10 - Short rotation woody energy crop supply chains, Editores: Jens Bo Holm-Nielsen, Ehiaze Augustine Ehimen, Biomass Supply Chains for Bioenergy and Biorefining, Woodhead Publishing, 217-248.

