

ELABORACIÓN DE PELLETS COMBUSTIBLES A PARTIR DE BAGAZO DE AGAVE

PRODUCTION OF FUEL PELLETS FROM AGAVE BAGASSE

Eliud Escudero Enríquez
Sergio Iván Martínez Guido
Oscar Daniel Lara Montaña
Claudia Gutiérrez Antonio*

Universidad Autónoma de Querétaro, México

*claudia.gutierrez@uaq.mx

Resumen

Uno de los retos más cruciales de la actualidad es satisfacer de la creciente demanda energética a nivel mundial. Durante el último siglo la explotación y uso de los combustibles fósiles ha permitido el desarrollo de las actividades humanas; sin embargo, estos materiales no renovables presentan graves inconvenientes, tales como su impacto ambiental y su inminente agotamiento. En oposición, existen distintas energías renovables, entre las que destacan los biocombustibles que son obtenidos a partir del procesamiento de biomasa. El presente trabajo se enfoca en el uso del bagazo de agave como materia prima para la elaboración de pellets combustibles, los cuales son biomasa compactada en forma de pequeños cilindros que al combustionar generan energía aprovechable. Para la realización del estudio, el bagazo de agave fue recolectado y caracterizado en términos de su humedad, cenizas, carbono, compuestos volátiles y poder calorífico; después, se sometió a un proceso de pelletización con dos diferentes tamaños de partícula, obteniendo así pellets combustibles. Posteriormente, los productos fueron caracterizados con base en los parámetros fisicoquímicos previamente mencionados, los cuales fueron contrastados con lo establecido en la norma ISO 17225. A pesar del déficit en poder calorífico y cenizas, los resultados mostraron que los pellets elaborados tienen propiedades promisorias y, aunque se determinó que en este primer estudio los productos estaban lejos de cumplir la normativa, se identificaron los parámetros del proceso que deben ser modificados para satisfacer el estándar.

Palabras clave: bagazo de agave, biocombustibles, bioenergía, pellets combustibles, residuos, revalorización.

Satisfying the rising global energy demand is an important and complex challenge that both current and future generations must face. During the last century and a half, the exploitation and use of fossil fuels have allowed the development of human activities. These non-renewable fuels have serious drawbacks, including their environmental impact and their imminent exhaustion. Different renewable energies, including biofuels, are obtained from biomass processing. This work focuses on fuel pellets, which are compacted biomass in the form of small cylinders that generate usable energy

when combusted. In the present study, agave bagasse, the main residue in the tequila and mezcal industries, was used as raw material to produce fuel pellets. The agave bagasse was collected and characterized in terms of its moisture, ash, carbon, volatile compounds, and calorific value. Afterward, the bagasse was subjected to a pelletization process with two different particle sizes, thus obtaining fuel pellets. The pellets were characterized based on the previously mentioned physicochemical parameters, which were contrasted with those indicated at the ISO 17225 standard. The results showed that despite the deficit in calorific power and ash, the pellets produced have promising properties. It was determined that the pellets do not comply with the regulations, but the process parameters that must be modified to meet the regulations were identified.

Keywords: agave bagasse, biofuels, bioenergy, fuel pellets, residues, revalorization.

Introducción

A nivel internacional, la generación de residuos crece de manera significativa cada año. Entre 2012 y 2016 el incremento fue del 55 % y las estimaciones proyectan que para 2050 este porcentaje aumentará otro 50 % [2]; de estos residuos, los verdes (materia biodegradable, restos de poda, hojas, ramas o residuos leñosos) y alimenticios son los que conforman el grupo de mayor volumen [2], [3]. Por otro lado, en cuanto a nivel nacional, en el periodo comprendido entre 2003 y 2015 se observó en México un incremento del 61.2 % en la generación de residuos [3]. A su vez, en el 2012 se estimó que el potencial energético de 52 104 millones de toneladas de residuos agroindustriales se desaprovechó [4]. Ante esta perspectiva, y dado que se prevé un incremento en los residuos generados por el país, se enfatiza la importancia en el aprovechamiento de

los residuos, ya que pueden ser una vía para satisfacer parcialmente la demanda energética del país.

Las industrias tequilera y mezcalera son algunas de las empresas generadoras de residuos agroindustriales con potencial energético, en particular, la primera presenta una tendencia alcista, ya que su producción ha aumentado en los últimos 10 años en un 45.24 % [7]. Por una parte, el

crecimiento de esta industria impacta de manera positiva en la economía del país, puesto que aumenta el número de empleos, exportaciones e inversiones, entre otros indicadores [7-9]; paralelamente, su desarrollo conlleva un incremento en los residuos que se generan [7] y son desechados a pesar de su potencial energético. El bagazo de agave se encuentra entre estos desperdicios.

De composición fibrosa, el bagazo de agave se genera durante la etapa de molienda en la fabricación de los destilados y representa el 40 % del peso de la piña del agave [10]. Entre los inconvenientes que posee este residuo se encuentran la alta humedad y una lenta tasa de degradación que, aunadas a su inadecuada disposición, generan contaminación. A raíz de este problema se han propuesto alternativas para revalorizar el bagazo de agave, tales como la obtención de compuestos bioactivos y aglomerados [11], o la producción de alimentos y biomateriales [12]. En el área de los bioenergéticos, la conversión del bagazo de agave se ha propuesto para la fabricación de biocombustibles tanto líquidos [12-15] como gaseosos [16-19]; no obstante, la síntesis de biocombustibles sólidos es una alternativa poco explorada para la revalorización de bagazo de agave derivado de la industria tequilera. Por ejemplo, en el trabajo presentado por Blancarte Contreras et al. [20] se utilizó el agave residual generado durante la elaboración del mezcal; a su vez, Chávez Guerrero e Hinojosa [21] estudiaron el calor de combustión de fibras de agave mezcalero, bagazo sin tratar y pirolizado; sin embargo, ninguno de los trabajos proviene del proceso de elaboración de tequila ni evalúa la misma especie vegetal.

Los pellets combustibles están constituidos por biomasa lignocelulósica compactada, estos representan una fuente de energía térmica y/o eléctrica aprovechable a nivel residencial e industrial. Son resultado de un proceso de acondicionamiento conocido como densificación de bio-



Existen combustibles renovables, como es el caso del biocombustible obtenido a partir del procesamiento de biomasa. El presente trabajo se enfocará en el uso del bagazo de agave como materia prima para la elaboración de pellets combustibles.



TABLA 1.

Valores reportados de la composición química del bagazo de agave y rango de valores para materias primas convencionales en la elaboración de pellets combustibles.

masa, del cual se obtiene un producto con bajo contenido de humedad, alta densidad energética, tamaño y forma homogéneos [22], [23]. Por lo general, la elaboración de los pellets combustibles se lleva a cabo con aserrín proveniente de la industria maderera [22] y el proceso se divide en trituración, secado, acondicionamiento y densificado [24]. En cambio, de acuerdo con la norma CEN/TC 14961 [22], mostrada en la Tabla 1, la composición química del bagazo de agave es similar a la que presentan las mezclas tradicionalmente empleadas como materia prima.

COMPUESTO (% EN MASA)	BAGAZO DE AGAVE				MATERIA PRIMA CONVENCIONAL
	ALONSO Y RIGAL [25]	LIÑÁN-MONTES ET AL. [26]	KESTUR ET AL. [27]	CANO-DÍAZ ET AL. [28]	OBERNBERGER Y THEK [22]
Celulosa	43	41.86	73.6	51.82	30 - 40
Lignina	15	7.04	21.1	16.64	30 - 45
Hemicelulosa	19	4.41	-	28.18	25 - 30
Nitrógeno total	3	2	-	-	-
Pectinas	1	-	-	-	-
Grasas	1	-	-	-	-
Azúcares reductores	5	-	-	-	-
Cenizas	6	7.4	5.3	2.57	-
Otros	2	-	-	-	-
Humedad	5	6.44	-	-	-

La elaboración de pellets combustibles a partir de materias primas alternativas al aserrín es un campo que ya ha sido explorado. Sobre esta vía, múltiples biomásas han sido propuestas y evaluadas para su aprovechamiento. Por ejemplo, se ha estudiado la producción de pellets combustibles a partir de residuos forestales, municipales, industriales y provenientes de aglomerados, aserraderos y mueblerías [29]; también se ha propuesto el uso de paja de frijol [30], cáscara de arroz [31], restos de café [32] y corcho [33], así como mezclas de corcho con podas de vid [34] y de remanentes de cebada y aserrín de pino [35].

En este estudio se propone emplear bagazo de agave, proveniente de las industrias mexicanas del tequila y del mezcal, como materia prima y someterlo a un proceso de pelletización. Posteriormente, se realizará una caracterización de los pellets obtenidos y se compararán los valores resultantes con los estipulados por la norma EN-ISO-17225-2, la cual establece los requisitos generales para biocombustibles sólidos.

Materiales y métodos

Materia prima

El bagazo de agave proviene de un magueyal local del municipio de Apaseo el Grande, dedicado a la elaboración de destilados de agave. Se desconocen el tiempo y las condiciones a las cuales estuvo expuesto previo a su recolección, dado que fue tomado de un sitio de almacenamiento al aire libre. Una vez recolectado, el bagazo fue trasladado a las instalaciones del campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro, y colocado sobre un área verde a campo abierto.

Caracterización fisicoquímica de la materia prima y de los pellets obtenidos

El bagazo de agave y los pellets obtenidos se caracterizaron de la siguiente manera (cabe agregar que los estudios se realizaron por triplicado):

- Poder calorífico superior (PCS), valorado por el método establecido por la ISO-18125-2017.
- Humedad, calculada mediante el método UNE-EN14774-1:2010 [37].
- Contenido de cenizas, obtenido mediante el método UNE-EN ISO 11822:2016 [38].
- Contenido de materia volátil, determinado con el método UNE-EN 15148:2010 [39].
- Porcentaje de carbono (C), nitrógeno (N), hidrógeno (H) y azufre (S), calculados mediante el método Dumas modificado [40].



Tratamientos

Se propusieron dos sistemas: el primero, identificado como Tratamiento P1, correspondiente a la fracción del bagazo de agave triturado que se encuentra entre las mallas 20 y 40; el segundo, identificado como Tratamiento P2, correspondiente a la fracción del bagazo de agave triturado que se encuentra después de la malla 40.

Proceso de pelletizado

El proceso de transformación del bagazo de agave comenzó con una fase de secado que se realizó aplicando radiación solar a la intemperie durante cinco días. A continuación, el bagazo se sometió a un tratamiento de reducción de tamaño a través de una picadora marca BOMERI modelo PD6RM con motor KOHLER de gasolina con potencia de 9.5 hp. Posteriormente, el bagazo ya triturado fue sometido a un tamizado empleando dos mallas de calibres 20 y 40; se separaron e identificaron las fracciones como P1 (fracción entre malla 20 y malla 40) y P2 (fracción que pasó por la malla 40). Después se realizó una segunda fase de secado donde la biomasa triturada y tamizada fue expuesta a radiación durante dos horas, al término de las cuales se registró la humedad de ambas fracciones. Seguidamente, ambas partes se sometieron a un proceso de densificado en una pelletizadora MELKO 7LSP200 C. Los comprimidos se dejaron enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente y se almacenaron en bolsas resellables para trasladarlos. Luego se extrajeron de las bolsas de transporte y se colocaron en charolas de aluminio durante un día en una tercera fase de secado. Por último, se almacenaron nuevamente en bolsas resellables.

Análisis estadístico

Los resultados experimentales de la biomasa y los pellets combustibles fueron evaluados mediante ANOVA, además de una prueba de mínima diferencia significativa (MDS) de Student, ambas con p igual a 0.05.

Resultados y discusión

Se identificó qué parámetros fisicoquímicos de los pellets obtenidos infringen la EN-ISO-17225-2; dicha información permite evaluar las causas del incumplimiento y proponer modificaciones para alcanzar la norma. Asimismo, al hacer una comparación entre los tratamientos se encontró una diferencia significativa en el desempeño de los diferentes tamaños de partícula. De los resultados se concluye que el bagazo tiene propiedades promisorias como materia prima para la elaboración de pellets combustibles.

Caracterización del bagazo de agave

En la Tabla 2 se presentan los parámetros del bagazo de agave previos al proceso de pelletización. En ella puede corroborarse que el contenido de energía es promisorio, debido a que los valores obtenidos se encuentran, en su mayoría, dentro del rango que solicita la norma. Los únicos valores que incumplen con lo requerido son los contenidos de cenizas y nitrógeno.

TABLA 2.

Valores de los parámetros analizados en el bagazo de agave obtenidos en este estudio, así como aquellos reportados en la literatura.

REFERENCIA	PCS (MJ/kg)	HUMEDAD (%)	CENIZAS (%)	VOLÁTILES (%)	C (%)	N (%)	H (%)	S (%)
Bagazo de agave (este estudio)	16.78	4.63	15.55	78.60	34.57	1.95	4.38	< 0.01
Frijol [30]	8.22 -15.99	8.53 - 10.71	4.96 - 6.22	93.66 - 94.59	53.98 - 54.72	0.61 - 6.41	-	-
Aserrín [41]	14.725	6.51	2.19	-	-	-	-	-
EN plus A1 [42]	16.56	< 10	< 0.7	-	-	< 0.3	-	< 0.04
EN plus A2 [42]	-	-	< 1.2	-	-	< 0.5	-	< 0.05
EN plus B [42]	-	-	< 2.0	-	-	< 1	-	

Caracterización de los pellets obtenidos

Los pellets elaborados se situaron para el proceso de pelletización con una lectura de humedad de 25 % para P1 y 30 % para P2. Los análisis rea-



TABLA 3.

Valores de los parámetros analizados en los pellets obtenidos.

lizados en este estudio (Tabla 3) muestran que, en comparación con el bagazo de agave, el poder calorífico disminuyó en promedio un 32.3 %, el contenido de cenizas aumentó un 142 % y el contenido de azufre pasó de < 0.01 % a ~9.65 %. Por otro lado, el contenido de sólidos volátiles disminuyó en promedio un 39.16 %.

	PCS (MJ/KG)	HUMEDAD (%)	CENIZAS (%)	VOLÁTILES (%)	C (%)	N (%)	H (%)	S (%)
P1	12.19	4.11	39.45	34.17	32.06	2.85	4.05	9.67
P2	10.53	5.67	35.81	61.47	27.50	2.90	3.33	9.62
Astillas de madera [22]	17.64 - 18.72	-	0.4 - 1.3	76.0 - 86.0	47.1 - 51.6	0.09 - 0.17	6.1 - 6.3	0.007 - 0.10
Corteza [22]	17.64 - 20.16	-	2.0 - 5.0	69.6 - 77.2	48.8 - 52.5	0.10 - 0.50	4.6 - 6.1	0.01 - 0.20
Paja [22]	-	-	4.9 - 6.0	70.0 - 81.0	43.2 - 48.1	0.3 - 0.05	5.0 - 6.0	0.05 - 0.11
Restos de corcho [43]	21.41	8.02	4.81	-	50.50	0.43	5.80	0.03
Aserrín de pino [43]	20.80	9.30	0.90	-	50.50	0.48	6.10	0.03
Brotos de vid [43]	18.70	10.80	7.10	-	46.90	0.58	5.70	0.05
Ramas de olivo [43]	18.82	6.50	3.32	-	47.02	0.34	7.62	0.00
Paja de cebada [43]	17.43	7.20	10.51	-	43.85	0.77	5.50	0.10
Paja de trigo [43]	18.25	9.40	9.10	-	45.10	0.91	6.00	0.00
EN plus A1 [42]	16.56	<10	< 0.7	-	-	< 0.3	-	< 0.04
En plus A2 [42]			< 1.2	-	-	< 0.5	-	< 0.05
En plus B [42]			< 2.0	-	-	< 1	-	

Discusión

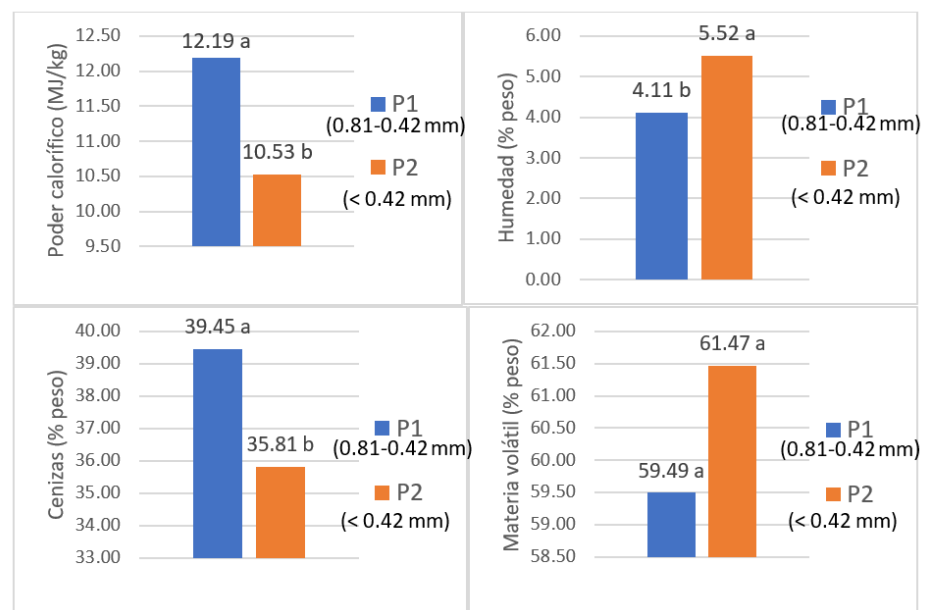
Los datos experimentales obtenidos del análisis realizado con la prueba MDS de Tukey con $p < 0.05$ revelaron que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los pellets elaborados con los tratamientos P1 y P2. Dicha disparidad se evidencia en la discrepancia entre los

valores de PCS, contenidos de humedad, cenizas y materia volátil que presentó cada tratamiento, lo que indica que existe un efecto en el tamaño de partícula empleado.

De la comparación de los pellets que resultan de los dos tratamientos considerados, resalta que P1 tiene un mayor poder calorífico y un menor contenido de humedad y de materia volátil; mientras que P2 ostenta un menor contenido de cenizas. Por otro lado, con respecto al análisis elemental realizado, se observó que aquellos pellets constituidos a partir del tratamiento P1 exhibieron un mayor contenido de carbono pero menor de nitrógeno, en comparación con los derivados del tratamiento P2. Sobre esta misma línea, en cuanto al hidrógeno, P1 es el que tiene mayor proporción, aunque P2 es el que cuenta con menor porcentaje de azufre (Figura 1). Del análisis de los parámetros fisicoquímicos, se infiere que el tratamiento con las mejores características es P1.

FIGURA 1.

Representación gráfica de los resultados obtenidos para las propiedades de los pellets elaborados. Las letras a y b indican el grupo estadístico correspondiente a cada valor, de acuerdo con la prueba MDS de Tukey con $p < 0.05$.



Al evaluar los resultados de P1, es claro que el valor de PCS de 12.19 MJ/kg está por debajo de la normativa, pues el valor requerido es de 16.53 MJ/kg. Por el contrario, los contenidos de cenizas, azufre y nitrógeno sobrepasan el límite de la normativa. En otras instancias, de la comparación con pellets derivados de otras biomásas, se concluye que el tratamiento P1 posee un PCS menor y un contenido de cenizas y azufre superior.

El poder calorífico tiene una relación directa con el contenido de carbono e inversa con el de cenizas [43]; por tanto, la deficiencia de este factor



puede deberse a una baja concentración de carbono, una alta de cenizas, o una combinación de ambas. Sin embargo, en caso de reducirse el contenido de cenizas, se tendría un doble beneficio, ya que permitiría incrementar el poder calorífico y cumplir con lo establecido en la norma.

Por su parte, con respecto al poder calorífico y el contenido de azufre, cabe señalar que el bagazo de agave empleado como materia prima se encontraba dentro de los parámetros solicitados. En este contexto, es importante hacer notar que los pellets pasaron por un proceso de secado previo a ser analizados. Por tal motivo, es posible que los contenidos de humedad y azúcar permitieran la proliferación, no contemplada, de microorganismos con procesos biológicos capaces de generar compuestos azufrados. Un ejemplo son las bacterias oxidantes de azufre que, dentro del pellet, podrían llegar a tomar H_2S (g) y depositarlo como H_2SO_4 (ac) [44], [45], alterando su composición elemental y sus características fisicoquímicas. En este sentido, el control del nivel de humedad posterior a la molienda del bagazo podría ser una etapa clave para adecuar los parámetros fisicoquímicos del pellet.

Si bien se desconoce el proceso por el que pasó el bagazo antes de ser recolectado, se sabe que generalmente es desechado en el suelo [46]. En consecuencia, es factible que durante esta disposición se combine con óxidos de silicio y aluminio presentes en el terreno [47]. Dichos contaminantes podrían ser el motivo de la cantidad de ceniza que se reporta tanto en el bagazo como en los pellets [48]. De ser cierta esta hipótesis, un mayor control de la forma en que se desecha la biomasa previo a la molienda mejoraría la calidad de los pellets al reducir el contenido de ceniza.

Conclusión

En este estudio se describe la elaboración de pellets combustibles con dos distintos tamaños de partículas a partir de bagazo de agave. Durante el proceso se realizó la caracterización fisicoquímica tanto de la materia prima como de los pellets obtenidos; como resultado, se observó que los pellets combustibles incumplían con la norma EN-ISO-17225-2 debido a un bajo poder calorífico y un elevado porcentaje de cenizas. No obstante, a partir de la relación encontrada entre el contenido de cenizas

y el poder calorífico, será posible modificar la proporción de cenizas a través de puntos de control en la disposición del bagazo. Tal corrección podría dar como resultado pellets con mejores características. De igual modo, se vislumbra que la combinación de bagazo con una materia prima convencional, como el aserrín, podría ser una alternativa más para el aprovechamiento de este residuo.

Además de lo anterior, se encontró que el tamaño de la partícula de la materia prima afecta las propiedades fisicoquímicas de los pellets. Asimismo, debido a que durante el proceso de pelletización existe el riesgo de contaminación, se destaca la importancia de abordar estudios para observar si este fenómeno sigue presentándose. En otras instancias, con base en los resultados del análisis de la biomasa, se concluye que el bagazo de agave tiene potencial como materia prima para la elaboración de pellets combustibles. A su vez, se abre la posibilidad de emprender investigaciones que incluyan mezclas de esta biomasa con otras, para evaluar las propiedades de los pellets elaborados. Sin embargo, la manera en que se dispone del bagazo de agave en la industria lo expone a una contaminación que implica una posible disminución de la calidad del bagazo como biocombustible. Por eso es importante procurar una ampliación de los estudios para dimensionar la repercusión de esta etapa sobre el aprovechamiento del bagazo.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el patrocinio proporcionado al estudiante que desarrolló el proyecto, así como a la Universidad Autónoma de Querétaro por su apoyo durante el proceso de esta investigación.

Fuentes de financiamiento

El financiamiento de este estudio proviene del apoyo recibido por el proyecto 320583, de la Convocatoria de Ciencia Básica y/o de Frontera, Modalidad: Paradigmas y Controversias de la Ciencia 2022.



Referencias

- [1] "Years of fossil fuel reserves left", 2020. Our World In Data, 2015. Disponible: <https://ourworldindata.org/grapher/years-of-fossil-fuel-reserves-left>
- [2] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, F. V. Woerden, *What a waste 2.0 A global Snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Group, 2018.
- [3] SEMARNAT, "Informe de la Situación del Medio Ambiente en México". *Compendio de Estadísticas Ambientales*. Indicadores Clave de desempeño ambiental y de crecimiento verde. SEMARNAT, 2015.
- [4] SEMARNAT, "Diagnostico básico para la gestión integral de los residuos". SEMARNAT, 2020.
- [5] R. Palomo, I. López, F. Islas, K. L. Galindo, D. Munguía, J. A. Rincón, M. A. Cortés, F. Alatríste, E. Razo, "Agave biomass biorefinery: processing and perspectives", *Clean Tech Environ Policy*, vol. 20, no. 7, pp. 1423-1441, septiembre 2018.
- [6] A. Kumar, C. Ram, "Agave biomass: a potential resource for production of value-added products", *Environmental Sustainability*, vol. 4, no. 2, pp. 245-259, Abril 2021.
- [7] *Consumo de agave para Tequila y Tequila 100% de agave*. Consejo Regulador del Tequila. 2021, agosto, 30. Disponible: <https://www.crt.org.mx/EstadisticasCRTweb/>
- [8] SECTUR, "Diagnostico de competitividad y sustentabilidad para los denominados pueblos mágicos de Jalisco Estudio de Tequila". SECTUR, 2013.
- [9] BECLE S.A.B de C.V., "Información financiera trimestral primer trimestre", estado de información financiera, 2022.
- [10] M. Cedeño, "Tequila Production", *Critical Reviews in Biotechnology*, vol. 15, no. 1, pp. 1-11, 1995.
- [11] G. Iñiguez-Cobarrubias, S. E. Lange, R. M. Rowell, "Utilization of byproducts from the tequila industry: part 1: agave bagasse as a raw material for animal feeding and fiberboard", *Bioresource Biotechnology*, vol.77, pp. 25-32, 2001.
- [12] J. Álvarez-Chávez, M. Villamiel, L. Santos-Zea, A. K. Ramírez-Jiménez, "Agave by-products: An overview of their Nutraceutical Value,

- current applications, and processing methods", *polysaccharides*, vol.2, pp. 720-743, Septiembre 2021
- [13] A. Aguirre, H. A. Ruiz, M. A. Cerqueria, R. Ramos, R. M. Rodríguez, S. Marques, R. M. Lukasik, "Sustainable approach of high-pressure agave bagasse pretreatment for ethanol production", *Renewable Energy*, Vol. 115, pp. 1347-1354, 2020.
- [14] J. Arrizon, J. C. Mateos, G. Sandoval, B. Aguilar, J. Solis, M. G. Aguilar, "Bioethanol and Xylitol production from different lignocellulosic hydrolysates by sequential fermentation", *Journal of Food Process Engineering*, vol. 35, no. 3, pp. 437-454, 2018.
- [15] L. Caspeta, M. A. Caro, T. Ponce, A. Martinez, "Enzymatic hydrolysis at high-solids loadings for the conversion of agave bagasse to fuel ethanol", *Applied Energy*, Vol. 113, pp. 277-286, 2014.
- [16] A. Tapia, E. Ibarra, E. Razo, "Hydrogen and methane production potential of agave bagasse enzymatic hydrolysates and comparative techno-economic feasibility implications", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, no. 33, pp. 17792-17801, 2019.
- [17] V. Duran, S. Hernández, I. Ortíz, "Evaluation of steam explosion pretreatment and enzymatic hydrolysis conditions for agave bagasse in biomethane production", *BioEnergy Research*, vo. 14, pp. 1328-1337, January 2021.
- [18] J. J. Montoya, D. K. Olmos, R. Palomo, V. Montiel, A. G. Mari, E. Razo, "Improvement of continuous hydrogen production using individual and binary enzymatic hydrolysates of agave bagasse in suspended-culture and bio-film reactors", *Bioresource Technology*, vol. 283, pp. 251-260, 2019.
- [19] C. A. Contreras, H. O. Méndez, L. Arellano, F. Alatríste, E. Razo, "Continuous hydrogen production from enzymatic hydrolysate of Agave tequilana bagasse: effect of the organic loading rate and reactor configuration", *Chemical Engineering Journal*, vol. 313, pp. 671-679, 2017.
- [20] E. Blancarte, S. Corral, T. G. Domínguez, J. E. Lujan, J. R. Goche, E. Montiel, "Improving the physical, Mechanical and energetic Characteristics of Pine Sawdust by the addition of up to 40% Agave durangensis Gentry Pellets", *Energies*, 2022.



- [21] L. Chávez, H. Hinojosa, "Bagasse from the mezcal industry as an alternative renewable energy produced in arid lands", *Fuel*, vol. 89, no. 12, pp 4049-4052, 2010.
- [22] I. Obernberger, G. Thek, "The pellet handbook the production and thermal utilization of biomass pellets", Reino Unido, earthscan, 2010.
- [23] D. Sjoding, E. Kanoa, P. Jensen, "Developing a wood/densified biomass industry in Washington state: opportunities and challenges". United States of America, Washington State University Extension energy program, 2013.
- [24] Z. Kocsis, E. Csanády, Theory and practice of wood pellet production. Springer editorial, 2019.
- [25] M. S. Alonso, L. Rigal, "Caracterización y valorización del bagazo de agave tequilana weber de la industria del tequila", *Revista chapin-go serie horticultura*, vol. 3, no. 2, pp. 31-19, 1997.
- [26] A. Liñán, S. M. de la Parra, M. T. Garza, R. B. García, E. Soto, F. J. Cerino, "Characterization and thermal analysis of agave bagasse and malt spent grain", *J Therm Anal Calorim*, vol. 115, no. 1, pp. 751-758, 2014.
- [27] S. Kestur, T. H. S. Flores, L. P. Dos Santos, J. Dos Santos, I. Mazzaro, A. Mikowski, "Characterization of blue agave bagasse fibers of mexico", *Composites: Part A*, vol. 45, pp. 153-161, 2013.
- [28] G. S. Cano, A. Rosas, E. Vivaldo, L. Flores, M. A. Vega, M. G. Hernández, A. Martinez, "Determination of the composition of lignocellulosic biomasses from combined analyses of thermal, spectroscopic, and wet chemical methods", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 60, pp. 3502-3515, 2021.
- [29] J. A. Japhet, B. S. Luka, I. B. Maren, S. G. Datau, "The potential of wood and agricultural waste for pellet fuel development in Nigeria – A technical review", *IJEAST*, vol. 4, no. 11, pp. 598-607, Marzo 2020.
- [30] D. Trejo Zamudio, "Producción de pellets de residuos de cultivo de frijol con máximo contenido energético", tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, UAQ, Querétaro, Qro. 2018.
- [31] N. Hernández, C. Gutiérrez, J. F. García, A. A. Feregrino, M. Toledano, "Valorización de cascarilla de arroz y paja de frijol mediante la produc-

- ción de pellets combustibles: un enfoque experimental y de modelado”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 21, no.2, 2022.
- [32] L. A. Rodríguez, “Producción de pellets combustibles de cascabillo de café con máximo poder calorífico”, tesis de maestría, Facultad de ingeniería, UAQ, Querétaro, Qro. 2021.
- [33] I. Montero, M. T. Miranda, F. J. Sepúlveda, J. I. Arranz, M. J. Trinidad, C. V. Rojas. *Analysis of pelletizing of wastes from cork industry*. Dyn Energ. Sostenibilidad 2014, 3, DOI:10.6036/ES7011.
- [34] I. Mediavilla, M. J. Fernández, L. S. Esteban, “Optimization of pelletization and combustion in a boiler of 17.5 kWth for vine shoots and industrial cork residue”. *Fuel Processing Technology*. 2009, 90, 621–628.
- [35] C. Serrano, E. Monedero, M. Lapuerta, H. Portero, “Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets”. *Fuel Processing Technology*. 2011, 92, 699–706
- [36] International Organization for Standardization, “ISO 18125:2017 Solid biofuels – Determination of calorific value”, 18125, Abril, 2017.
- [37] Asociación Española de Normalización, “UNE-EN 14774-1:2010 Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 1: Humedad total. Método de referencia”, 14774-1, Agosto 14, 2010.
- [38] Asociación Española de Normalización, “UNE-EN ISO 18122:2016 Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de ceniza”, 18122, Abril 13, 2016.
- [39] Asociación Española de normalización, “UNE-EN 15148:2010 Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de materias volátiles”, 15148, Abril 06, 2016.
- [40] Analytical Methods Committee, “CHNS Elemental Analysers”, AMCTB 29, April. 2008.
- [41] C. Vasilatos, C. Dimitris, T. Theodorou, C. Stouraiti, M. Andreadi, N. Koukouzas, “A comparative study of selected properties of biomass and coal fuels from Greece”, *Materials Proceedings*, vol. 5, 2021.
- [42] Solid biofuels – Fuel specifications and classes – part 2: graded wood pellets, ISO 17225-2:2021, 2021.



- [43] T. Miranda, I. Montero, F. J. Sepúlveda, J. I. Arranz, C. V. Rojas, S. Nogales, "A review of pellets from different sources", *Materials Proceedings*, vol. 8, pp. 1413-1427, 2015.
- [44] L. E. Young, C. Kyung-Suk, R. H. Wook, "Simultaneous removal of H₂S and NH₃ in biofilter inoculated with acifithiobacillus thiooxidans TAS", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 99, no. 6, pp. 611-615, 2005.
- [45] K. Rana, N. Rana, B. Singh, "Applications of sulfur oxidizing bacteria", *Physiological and Biotechnological Aspects of Extremophiles*, R. Salwan y V. Sharma, Eds. Academic Press, 2020, pp. 131-136.
- [46] Consejo Regulador del Tequila, *Manual del técnico Tequilero*. Consejo Regulador del tequila, 2019.
- [47] I. Inamuddin, M. I. Ahamed, R. Boddula, T. A. Altahi, *Applied soil chemistry*. Wiley editorial, 2021.
- [48] M. A. Abdoli, A. Golzary, A. Hosseini, P. Sadeghi, *Wood Pellets as a renewable source of energy from production to consumption*. Springer Editorial, 2018.