

# ESTUDIOS DE LAS PROPIEDADES COMBUSTIBLES DE LA PAJA DE TRIGO

**Torres Ramos, Ricardo**

Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas  
Mexicali, México  
ricardo.torres26@uabc.edu.mx  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2529-926X>

**Beleño Cabarcas, Mary Triny**

Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas  
Mexicali, México  
mary.beleno@uabc.edu.mx  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9211-3106>

**Quijada Balcazar, Victor Alonso**

Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas  
Mexicali, México  
victor.quijada.balcazar@uabc.edu.mx

**Mendoza, Aurelia**

Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas  
Mexicali, México  
aurelia.mendoza@uabc.edu.mx  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1625-2128>

**Encinas Fregoso, Ruben**

Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas  
Mexicali, México  
ruben\_encinas@uabc.edu.mx

## RESUMEN

El trigo es uno de los cultivos más representativos de México, con una superficie anual cultivada de 11.7 millones de hectáreas. Si embargo, esta actividad agropecuaria genera alrededor de 85.3 millones de toneladas de paja de trigo. Una fracción importante de la paja generada se quemó a cielo abierto, como mecanismo para la remoción de residuos. No obstante, la paja de trigo posee importantes propiedades fisicoquímicas que pueden ser utilizadas con fines energéticos. El objetivo de este trabajo, fue realizar un estudio de las propiedades combustibles de la paja de trigo y conocer su potencial energético como combustible renovable. Se determinó el poder calorífico superior y se realizó el análisis proximal, el cual incluye el contenido de carbono fijo, cenizas, volátiles y humedad. Los resultados experimentales indicaron que la paja de trigo presenta 6.65% de humedad, 67.32% de materia volátil, 7.48% de cenizas y 18.45% de carbono fijo. El poder calorífico superior fue 13.64 MJ/kg, y teniendo en cuenta la cantidad de residuo, se estima que el potencial energético asciende a 1.2 TJ. Estos resultados son de vital importancia dado que hace posible proponer aplicaciones y seleccionar tecnologías para la explotación de la energía contenida en la biomasa residual.

**Palabras clave:** biomasa, energía, residuos agrícolas

## ABSTRACT

Wheat is one of Mexico's most representative crops, with an annual cultivated area of 11.7 million hectares. However, this agricultural activity generates around 85.3 million tons of wheat straw. A significant fraction of the wheat straw generated is burned in the open, as a mechanism for waste removal. However, wheat straw has important physicochemical properties that can be used for energy purposes. The objective of this work was to study the combustible properties of wheat straw and to determine its energy potential as a renewable fuel. The higher calorific value was determined and the proximate analysis was carried out, which includes the content of fixed carbon, ash, volatiles and moisture. The experimental results indicated that wheat straw has 6.65% moisture, 67.32% volatile matter, 7.48% ash and 18.45% fixed carbon. The gross calorific value was 13.64 MJ/kg, and taking into account the amount of residue, the energy potential is estimated at 1.2 TJ. These results are of vital importance since they make it possible to propose applications and select technologies for the exploitation of the energy contained in the residual biomass.

**Keywords:** biomass, energy, agricultural wastes

## 1. INTRODUCCIÓN

El trigo es considerado el cultivo más importante de México, debido a las extensas áreas que se destinan anualmente para este fin. En 2021, la superficie cosechada alcanzó 11.7 millones de hectáreas SIAP (2022), lo cual dio lugar a la generación de aproximadamente 85.3 millones de toneladas de paja, considerando un índice de generación de 7.3 toneladas por hectárea Montero et al., (2017). La incineración a cielo abierto de los residuos agrícolas tiene un impacto negativo sobre la salud pública y provoca serios problemas ambientales debido a la emisión de CH<sub>4</sub>, CO y material particulado Coronado et al. (2012). No obstante, la paja del trigo presenta un contenido energético importante y susceptible para la producción de energía térmica, eléctrica o la obtención de combustible sólido.

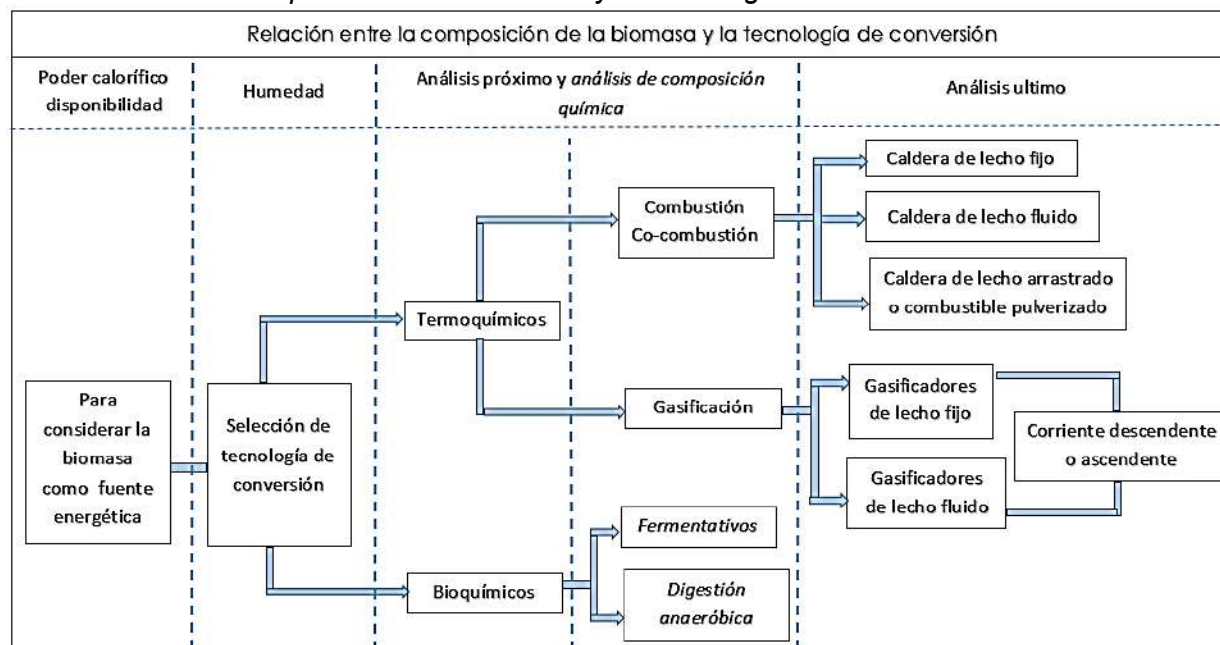
Las características físicas y químicas de la paja de trigo, son afectadas por las condiciones propias de la región donde se produce, es decir, su composición varía según las propiedades del suelo, el tipo de clima, el agua, el sistema de riego, entre otras Heras (2008); García et al. (2014). Por tanto, cada región en particular debe estudiar y llevar a cabo la caracterización física y química de sus residuos agrícolas, con el fin de proponer aplicaciones y seleccionar tecnologías que conlleven a la explotación de la energía contenida en la biomasa residual. Una caracterización fisicoquímica completa de la paja de trigo involucra cuatro análisis principales que se enuncian a continuación:

- Determinación del Poder Calorífico Superior (PCS), constituye una medida de la cantidad de energía que puede ser liberada por unidad de masa de materia, a través de una reacción de oxidación.
- Análisis de la composición química, comprende los porcentajes de lignina, celulosa y hemicelulosa.
- Análisis elemental o último, consiste en medir el contenido de carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno y oxígeno.
- Análisis próximo o inmediato, incluye el porcentaje de humedad, carbono fijo, materia volátil y contenido de cenizas.

Cada uno de los análisis tiene una finalidad diferente y evalúa propiedades diferentes. También, permiten establecer una guía o una ruta que permite seleccionar la manera más adecuada para la conversión energética, como se muestra en la Figura 1.

**Figura 1**

*Relación entre la composición de la biomasa y la tecnología de conversión*



El análisis próximo es quizás, entre los análisis mencionados, el que presenta menor complejidad puesto que no requiere sofisticados equipos de laboratorio. Sin embargo, la información que suministra es indispensable para determinar el proceso de conversión más conveniente (procesos biológicos o termoquímicos), también permiten establecer criterios de calidad de combustible, entre otros. El análisis próximo incluye la determinación de humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas. Cada uno de estos parámetros proporciona información de interés en la caracterización de los combustibles sólidos. La humedad presente en la paja de trigo favorece la transformación de ésta en biocombustibles, a través de procesos biológicos. Estos procesos utilizan organismos vivos, como hongos y enzimas que no son afectados por el porcentaje promedio de humedad libre e higroscópica que presenta la paja de trigo. Sin embargo, cuando se piensa en la paja como biocombustible sólido, la humedad trae consigo varios inconvenientes. Esta añade peso no valioso al combustible, haciendo que disminuya su densidad aparente. Provocando aumentos en los costos de transporte y creando la necesidad de disponer depósitos de almacenamiento más grandes Nogues, García & Reseau (2010). A diferencia de los procesos biológicos, los efectos ocasionados por la humedad son apreciables en los procesos termoquímicos, puesto que la evaporación del agua implica consumo de energía. Parte de la energía del combustible es usada en la evaporización de ésta, disminuyendo la calidad y la eficiencia de la combustión. El deterioro y la calidad física de la paja, también se encuentra relacionada con la humedad que facilita el proceso de respiración microbiana. No obstante, estos problemas son superados con hornos de secado y especificaciones en el diseño del sistema de combustión García et al. (2014). El contenido de materia volátil en un combustible, se considera como la fracción (excepto la humedad) que se libera cuando dicho combustible se calienta a alta temperatura en ausencia de aire Montero et al. (2017). La masa liberada por efectos del calentamiento proviene de dos fuentes. La primera es la fuente orgánica o fracción energéticamente activa del combustible, compuesta por hidrocarburos de bajo peso molecular, monóxido de carbono e hidrógeno. Y la segunda, es la fuente inorgánica o fracción energéticamente inactiva del combustible, compuesta por dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido y trióxido de azufre García et al. (2014). El contenido de volátiles en la biomasa

constituye una importante propiedad que influye en la descomposición térmica y el diseño de la planta. Los volátiles, también son responsables de la reactividad que presenta el combustible. Un alto contenido de volátiles hace más fácil la ignición a bajas temperaturas, incrementando la eficiencia del proceso de combustión Nogues (2010). El carbono fijo es la fracción remanente después de que la materia volátil se libera completamente, con excepción de las cenizas y la humedad, este se quema y forma *Char* Montero et al. (2017). Su valor es usado para calcular el tiempo de resistencia al quemado hasta completar la combustión. Permitiendo determinar el flujo másico óptimo de alimentación a la caldera. El cociente que se obtiene al dividir la materia volátil entre el carbono fijo, es usado como un índice del grado de reactividad de la biomasa. Cuanto mayor sea este factor, más fácil es el encendido y menor es la etapa de la residencia hasta completar la combustión García et al. (2014). La ceniza es el residuo inorgánico que queda después de la combustión de carbono fijo. Es un factor a tener en cuenta debido a que disminuye el poder calorífico y la eficiencia de la combustión, puesto que su deposición en los tubos de las calderas o intercambiadores dificulta la transferencia de calor. Los altos contenidos de cenizas afectan los costos de transporte, las emisiones de polvo, el mantenimiento, los procesos y tratamientos, así como la tecnología de combustión elegida. Sin embargo, las cenizas pueden ser utilizadas como fertilizantes para el tratamiento de suelos erosionados o en la industria de hormigón Nogues (2010). La metodología del análisis próximo resulta de vital importancia para proponer aplicaciones y seleccionar tecnologías enfocadas a la explotación de la energía contenida en la biomasa residual. Es por ello que el objetivo del presente trabajo fue realizar un estudio preliminar para la caracterización fisicoquímica de la paja de trigo del Valle de Mexicali, mediante dicha metodología que incluye: la determinación del contenido de humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo, expresados en porcentaje másico.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras de paja de trigo fueron colectadas en el valle de Mexicali ubicado en el Estado Baja California. Las muestras fueron trituradas hasta obtener un tamaño de partícula entre 0.25 - 0.21 mm. El análisis próximo se realizó siguiendo la metodología establecida en la ASTM E870-82. El contenido de humedad, material volátil y cenizas se determinaron de acuerdo con los estándares ASTM E871, ASTM E872 y ASTM D1102-84, respectivamente. Para determinar el PCS, la biomasa se comprimió en pastillas de peso menor o igual a 1 g. Las pastillas se introdujeron en la bomba calorimétrica y se realizó el procedimiento establecido en la ASTM E711.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados preliminares indicaron que la paja de trigo presentó: 6.65% de humedad, 67.32% de materia volátil, 7.48% de cenizas y 18.45% de carbono fijo, como muestra en el Tabla 1. Los ensayos se realizaron por triplicado y se calculó la desviación estándar.

**Tabla 1**  
*Resultados del análisis próximo*

Muestras	% Humedad	% Carbono fijo	% Materia volátil	% Cenizas	PCS (MJ/kg)	% Total
N° 1	6.6566	18.4784	67.2586	7.4727	13.5780	99.8663
N° 2	6.6458	18.4307	67.3491	7.5180	13.6800	99.9436
N° 3	6.6587	18.4597	67.3694	7.4562	13.6570	99.9440
Promedio	6.6537	18.4519	67.3257	7.4823	13.64	99.9136
D.E.	0.0069	0.0246	0.0589	0.0319	0.0535	

\*D.E. desviación estándar

Los resultados obtenidos son consistentes y una desviación estándar relativamente baja. Esto demuestra que se tomaron en cuenta todas las recomendaciones pertinentes establecidas en las normas ASTM relacionado a la preparación de las muestras, condiciones experimentales y metodología. Los análisis se realizaron bajo condiciones estrictamente controladas de temperatura, tiempo, atmósfera, especificaciones de peso y equipos. Lo que contribuyó al comportamiento constante que se observa en las muestras analizadas. El valor bajo de la desviación estándar calculada demuestra la confiabilidad y la validación de la experimentación. La paja de trigo es un residuo con alto contenido de volátiles, lo cual se puede asociar con una alta reactividad. Dicha reactividad implica la formación de extensas llamas durante la fase inicial de combustión de la biomasa. Estas características de combustión influyen en el diseño y especificaciones de calderas, por lo tanto, proporcionan información sobre el tipo de combustible con el que se puede combinar la paja de trigo, con la finalidad de llevar a cabo su transformación en energía a través de procesos termoquímicos Singh, Sarkar & Chakraborty (2020). En este sentido, el suministro energético a partir de la paja de trigo del Valle de Mexicali supone alguna restricción para su co-combustión (carbón y paja de trigo). Es necesario que la planta termoquímica utilizada para la conversión, este diseñada para operar con carbón de tipo *Sub-Bituminoso A, B, C de altos volátiles* (clasificación américa) o con carbón *Turba* (clasificación europea), para obtener de esta forma los mayores beneficios energéticos. Esto se debe a que el carbón mencionado presenta contenidos de volátiles similares a la paja de trigo analizada Cheng et al. (2022).

El poder calorífico superior fue 13.62 MJ/Kg, el cual se encuentra en el rango de los valores reportados en la literatura Phyllis (2022). Sin embargo, es considerablemente más bajo respecto a los carbones subbituminoso. El potencial energético derivado de los residuos que generan los cultivos de trigo asciende a 1.2 TJ de energía.

#### 4. CONCLUSIONES

Los parámetros determinados en el análisis próximo para la paja de trigo se encontraron dentro de los rangos reportados en la literatura. Su conocimiento y determinación resulta de gran relevancia ya que contribuirán en la propuesta y selección de alternativas para el aprovechamiento energético de la biomasa residual que derivarán en la aplicación de procesos de transformación tales como: termoquímicos (pirólisis, gasificación, combustión), y biológicos (fermentación y digestión anaeróbica).

#### REFERENCIAS

- Cheng, W., Zhu, Y., Zhang, W., Jiang, H., Hu, J., Zhang, X., ... & Chen, H. (2022). Effect of oxidative torrefaction on particulate matter emission from agricultural biomass pellet combustion in comparison with non-oxidative torrefaction. *Renewable Energy*, 189, 39-51.
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2014). Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data. *Fuel*, 117, 1139-1147.
- María del Rosario Heras, Mercedes ballestero (2008). *Biomasa como recurso energético*. Fuentes de energía para el futuro, Vol. 1, No 1. p. 125.
- Montero, G., Coronado, M. A., Torres, R., Jaramillo, B. E., García, C., Stoytcheva, M., ... & Valenzuela, E. (2016). Higher heating value determination of wheat straw from Baja California, Mexico. *Energy*, 109, 612-619.
- Ortega, M. A. C., Alpírez, G. M., González, C. G., Sánchez, A. P., & Pelayo, L. J. P. (2012). Emisiones de las quemadas de paja de trigo en el Valle de Mexicali, 1987-2010. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28, 117-124.

- Phyllis. (2022). ECN Phyllis classification. <https://phyllis.nl/Browse/Standard/ECN-Phyllis#>. Visited (23.10.2022).
- Sebastián Nogués, F., García Galindo, D., & Rezeau, A. (Eds.). (2010). *Energía de la biomasa II (Energías renovables)* (Vol. 182). Pressas de la Universidad de Zaragoza.
- SIAP (2022). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Dirección URL: [https://nube.siap.gob.mx/avance\\_agricola/](https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/) (10.07.2022)
- Singh, R. K., Sarkar, A., & Chakraborty, J. P. (2020). Effect of torrefaction on the physicochemical properties of eucalyptus derived biofuels: estimation of kinetic parameters and optimizing torrefaction using response surface methodology (RSM). *Energy*, 198, 117369.

1

---

<sup>1</sup> Los autores del trabajo autorizan a la Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología (UNICyT) a publicar este resumen en extenso en las Actas del Congreso IDI-UNICyT 2023 en Acceso Abierto (Open Access) en formato digital (PDF) e integrarlos en diversas plataformas online bajo la licencia CC: Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

La Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología y los miembros del Comité Organizador del Congreso IDI-UNICyT 2023 no son responsables del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en este artículo