

REVALORIZACIÓN SUSTENTABLE DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES DE LA PRODUCCIÓN DE JITOMATE

SUSTAINABLE REVALORIZATION OF AGRO-INDUSTRIAL
WASTE FROM TOMATOES PRODUCTION

Luis Fernando Monroy Garduño
María Andrea Andrade Gómez
Pedro Estrada Ortiz
Beatriz Itzel Baeza López
Eric Téllez Ojeda
Rubén Moreno Hernández
Claudia Gutiérrez Antonio
Sergio Iván Martínez Guido*

* Universidad Autónoma de Querétaro, México
sergio.martinezg@uaq.mx, dciq.guido@gmail.com

Resumen

Los residuos agrícolas se han convertido en un problema global debido a la falta de una estrategia para su manejo; la mayoría de ellos termina en rellenos sanitarios o en el peor de los casos quemados, lo que deviene en el desaprovechamiento de su potencial. En otras instancias, México es el principal proveedor de jitomate a nivel mundial, puesto que contribuye con el 3.46 % del producto interno bruto. No obstante, dicha producción también conlleva la generación de grandes volúmenes de residuos. Bajo este contexto, el presente trabajo se centra en la elaboración de biocombustibles sólidos (pellets) a partir de residuos agrícolas orgánicos generados en la producción de jitomate. El objetivo de la propuesta es integrar los pellets a la cadena productiva como fuente de calor en los invernaderos sustituyendo al gas LP. Se llevó a cabo un estudio respecto a los residuos en la producción de jitomate; para dicho análisis se consideraron la cantidad de biomasa residual generada como base para la producción de pellets combustibles, las condiciones climáticas y el potencial energético en forma de biocombustible. Los resultados mostraron que los residuos generados en la producción de jitomate son capaces de suministrar más del 77 % de la energía requerida para la calefacción de invernaderos. Este porcentaje genera un ahorro económico superior a los 918 dólares y reduce un 87 % el impacto ambiental por periodo productivo, en comparación con el gasto de gas LP. En este sentido, la reintegración de los residuos como fuente de energía verde contribuye a transitar a la economía circular al generar biocombustibles que reducen la dependencia a los combustibles fósiles.

Palabras clave: biocombustibles sólidos, economía circular, residuos agrícolas, revalorización.

Agricultural waste has become a global problem due to the lack of a strategy for its management; most of it ends up in landfills or, in the worst cases, burned, which results in the wasting of its potential. In other instances, Mexico is the main supplier of tomatoes worldwide, contributing 3.46 % of the gross domestic product. However, such production also entails the generation of

large volumes of waste. In this context, the present work focuses on the elaboration of solid biofuels (pellets) from organic agricultural residues generated in tomato production. The objective of the proposal is to integrate pellets into the production chain as a heat source in greenhouses, replacing LP gas. A case study was carried out on tomato production residues, considering the amount of residual biomass generated as a basis for the production of fuel pellets, climatic conditions and energy potential in the form of biofuel. The results showed that the residues generated in tomato production are capable of supplying more than 77 % of the energy required for greenhouse heating. This percentage generates an economic saving of more than 918 usd and reduces the environmental impact per production period by 87 %, compared to the use of LP gas. In this sense, the reintegration of this waste as a source of green energy contributes to the transition to a circular economy by generating biofuels that reduce dependence on fossil fuels.

Keywords: solid biofuels, circular economy, agricultural waste, revalorization.

Introducción

En la actualidad la producción agrícola enfrenta desafíos como el aumento de la demanda, altos índices de desnutrición, efectos del cambio climático, sobreexplotación de recursos, disminución de la biodiversidad y pérdida de espacios fértiles. Estos problemas ponen en riesgo la capacidad del sector alimentario actual y oscurecen la proyección a futuro.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura [1], a fin de lograr una agricultura sostenible es imprescindible satisfacer las necesidades de las generaciones presentes y futuras; sin embargo, al mismo tiempo, se debe garantizar la equidad social y económica, la rentabilidad y la salud ambiental. Dichos requisitos forman parte de la estrategia *Hambre cero*, incluida en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Así, la agricultura protegida junto con los sistemas productivos bajo ambientes controlados (inver-



naderos, producción vertical y tecnologías hidropónicas/acuapónicas) son herramientas promisorias para la seguridad alimentaria. A su vez, los sistemas protegidos ofrecen rendimientos viables ante problemas de cambio climático (como la inestabilidad del clima), de plagas y enfermedades, así como de calidad de los suelos [2].

De acuerdo con Tsataras *et al.* [3], los sistemas productivos controlados mejoran la eficiencia en el uso del agua en comparación con los de campo abierto. Asimismo, se postula que, al promover la recirculación del agua, este tipo de tecnologías (invernaderos) propicia la reducción de fertilizantes entre un 20 y 30 %. A esas ventajas se suman:

- Productividad más elevada y constante.
- Mayor eficiencia en el uso de la tierra, los fertilizantes, los pesticidas, la mano de obra y la energía.
- Capacidad para satisfacer la demanda de manera rentable durante los meses más fríos, en comparación con la producción en campo abierto, ya que en algunos países las condiciones climáticas paralizan el sistema.
- Mejor control de las condiciones sanitarias y fitosanitarias para cumplir con los requisitos del mercado y reducir el daño a los cultivos.
- Reducción de la vulnerabilidad y del riesgo asociados a condiciones meteorológicas adversas que afectan negativamente los cultivos y la calidad del producto.
- Mayor capacidad de respuesta a los requisitos, cada vez más exigentes, de los consumidores con respecto al uso de pesticidas, condiciones sanitarias y protección de los trabajadores.

Se llevó a cabo un estudio de caso respecto a los residuos en la producción de jitomate; para dicho análisis se consideró la cantidad de biomasa residual generada como base para la producción de pellets combustibles, las condiciones climáticas y el potencial energético en forma de biocombustible.

No obstante, aún con estos beneficios, la producción protegida puede caer en una complejidad excesiva o requerir de equipos cuyo control implica un alto costo, lo que genera un impacto negativo a nivel económico y ambiental [4]. En términos ambientales, diversas investigaciones han buscado la mejora de este tipo de tecnologías enfocándose en aspectos como la reducción de los gastos de agua y energía requeridos para la irrigación y el bombeo [5]. Asimismo, se ha estudiado la relación entre el consumo de energía y la geometría del sistema [6], al igual que

el impacto del diseño de las tecnologías sobre la productividad [7]. En esta misma vía, el modelado, simulación y optimización de las variables involucradas en el rendimiento productivo han sido otros campos de análisis [8], así como el desarrollo de maquinaria inteligente [9].

En términos energéticos, la producción bajo invernaderos conforma los procesos productivos agrícolas más exigentes. Su consumo de energía representa entre el 20 y 40 % del costo total de producción, según el tipo de cultivo. Adicionalmente, en todo modelo de producción agrícola se genera una elevada cantidad de residuos a lo largo de la cadena productiva sin importar la tecnología implementada. De acuerdo con Dupuis [10], tales remanentes gozan de un alto potencial como fuente de energía alterna (Tabla 1). Sin embargo, el aprovechamiento de los grandes volúmenes de desechos es casi nulo, a pesar de su rico contenido de compuestos como la lignina, hemicelulosa y celulosa. Estos recursos valiosos son atractivos para su transformación en biocombustibles, en aras de una economía circular en los procesos productivos a través de estrategias sustentables de manejo.

TABLA 1.

Potencial energético de algunos residuos agrícolas.

Fuente: Dupuis [10].

CULTIVO	POTENCIAL DE RESIDUOS (TON/HA)	POTENCIAL ENERGÉTICO (TJ/AÑO)
ARROZ	13.772	3994.19
CAFÉ	3.468	12420
CAÑA DE PALMERA	43.442	381.6
MAÍZ	4.688	1186.37
PALMA DE ACEITE	5.228	4039.48
PLÁTANO	92.332	859.2
TOTAL 32.475	161.43	22880.84

En síntesis, el presente trabajo propone rescatar los residuos generados de la producción de jitomate en invernadero y revalorizarlos mediante su transformación en pellets. Se incluye una evaluación de la viabilidad económica y ambiental como fuente energética para el proceso de calefacción dentro de la misma producción.



Metodología

Revisión bibliográfica

La primera etapa se centró en el estudio de las necesidades productivas del jitomate en invernaderos, incluyendo las condiciones climáticas. Se llevó a cabo una investigación detallada sobre el manejo del cultivo en invernaderos con énfasis en el estudio de la temperatura óptima.

Análisis de producción de residuos generados

Tras la revisión bibliográfica, se pesaron desechos generados por poda para cuantificar la cantidad de residuos de jitomate y valorar su disponibilidad por ciclo productivo. De igual forma, se cotejaron las composiciones fisicoquímicas a partir de datos bibliográficos reportados. El poder calorífico y los contenidos de humedad y lignina fueron las variables de principal interés para la producción de pellets.

Una vez recolectados, se redujo el tamaño de los residuos con ayuda de una trituradora de forraje para facilitar el procedimiento al aumentar el área de contacto e incrementar la velocidad de deshidratación. Posterior a la deshidratación, se procedió con la pelletización, un proceso de densificado, donde se comprime el material orgánico por medio de rodillos giratorios hasta que tomen la forma de un gránulo o pellet. El proceso facilita el manejo de grandes porciones de materia, a la vez que concentra una mayor cantidad de energía en un menor volumen.

Balance energético

En esta etapa se realizaron los cálculos necesarios para evaluar la capacidad y potencial de los pellets producidos en la etapa anterior, por medio de la fórmula de capacidad calorífica (Ecuación 1). Dicha fórmula permite calcular el calor requerido (Q) para aumentar la temperatura dentro del invernadero (entre 3-5 °C) a partir de la multiplicación de poder calorífico (c), el diferencial de temperatura (ΔT) y la cantidad de aire (m). Con el objetivo de mantener la temperatura interior del invernadero, se consideró la totalidad de los residuos generados en la producción de

jitomates. Aunado a lo anterior, se efectuó un análisis económico de la viabilidad del biocombustible sólido producido, en comparación con el gas LP consumido para calefacción.

$$Q=cm\Delta T \quad \text{Ecuación 1}$$

Por otro lado, la Ecuación de enfriamiento de Newton (Ecuación 2) fue implementada para completar el balance de energía, estimando con ello el diferencial de temperaturas en el invernadero. En la expresión k representa la constante de enfriamiento por convección (en este caso, se consideró la del aire); T_A , la temperatura del ambiente; T , la temperatura del invernadero; dT , el diferencial de temperatura, y dt el tiempo transcurrido.

$$\frac{dT}{dt} = k(T - T_A) \quad \text{Ecuación 2}$$

Análisis de viabilidad económica y ambiental

Se calculó el gasto económico referente a la energía necesaria para mantener la temperatura óptima de producción dentro del invernadero al usar gas LP, así como su análogo correspondiente a la combustión de pellets. De igual forma, se analizó el ciclo de vida [11] con base en el marco normativo de la ISO-14040 [12]. A su vez, el inventario de emisiones se contabilizó mediante el GREET® Model [13].

Estudio de caso

En México hay aproximadamente 48 000 hectáreas de agricultura protegida, de las cuales cerca de 28 000 se destinan a fines hortícolas. Esta actividad tiene un crecimiento proyectado de 3 000 ha nuevas por año, genera más de 3.2 millones de toneladas de productos anuales y cuenta con un valor comercial superior a los 3000 MDD. Los invernaderos y casas-sombra representan una de las economías más crecientes del sector primario, considerando que dan origen a un aproximado de 453 mil empleos directos: 166 mil fijos y 287 mil temporales.

El 57 % de la superficie agrícola protegida se concentra en tres estados: Sinaloa (20 %), Jalisco (20 %) y Michoacán (17 %) [14]. Esta limitada distribución evidencia la necesidad de desarrollar tecnologías que promuevan



TABLA 2.

Temperaturas promedio mensuales de Amazcala, El Marqués, Querétaro.

Fuente: Weather Spark [15].

la implementación de la agricultura sostenible. Por tanto, se evaluó la viabilidad económica y ambiental de un invernadero de 3744.5 m³ ubicado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala.

La localidad de Amazcala se sitúa en el Municipio de El Marqués en el Estado de Querétaro a 1919 msnm; sus 6793 habitantes la posicionan en el tercer lugar de las comunidades más pobladas del municipio. El promedio de la temperatura anual de la comunidad es de 17 °C, con una máxima de 25 °C y una mínima de 10 °C [15]. Los promedios máximos y mínimos mensuales, necesarios para realizar los balances energéticos dentro del invernadero, se detallan en la Tabla 2.

TEMPERATURA (°C)	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
MÁXIMA	22	24	26	28	29	27	26	26	25	25	24	22
PROMEDIO	13	15	17	20	21	20	19	19	18	17	15	13
MÍNIMA	5	7	9	11	13	14	14	14	13	11	8	5

Análisis y discusión de los resultados

Revisión bibliográfica

De acuerdo con el *Manual técnico del cultivo de tomate* [16], la temperatura adecuada oscila entre los 20 y 30 °C durante el día y de 10 a 17 °C durante la noche, aunque el promedio óptimo de desarrollo está entre los 18 y 24 °C (Tabla 2). Con esta información se definieron las horas en que se requeriría calefacción para el ciclo productivo. El estudio de caso abarcó de mayo a octubre, y durante estos meses también se cuantificaron los residuos generados.

Con el propósito de respetar el termo-periodo y maximizar el beneficio productivo, se aprecia en la Tabla 2 el combustible necesario ajustado en cantidad y dependiente del mes en que se encuentra. De esta forma, mientras algunos meses, como mayo, requirieron de un aumento de 4 °C por un periodo de 4 horas al día, en otros, como septiembre, fue necesaria una alza de 3 °C durante 5 h. A su vez, en octubre hubo que incrementar la temperatura en 5 °C por un tiempo de 6 h. Si se toman como base estas tres relaciones de tiempo y temperatura se puede proyectar un requerimiento de aproximadamente 850 horas efectivas de calefacción para el periodo de producción

Análisis de los residuos generados de la producción de jitomate

Conforme a lo reportado por Reyes *et al.* [17], los desechos de la producción de jitomate poseen un poder calorífico aproximado de 4700 kcal/kg (19.74 MJ/kg de acuerdo con la Tabla 3). Según la norma ISO 17225-6 [12], estos materiales cumplen con el poder calorífico mínimo requerido en pellets compuestos de residuos agroindustriales, aproximadamente 3463 kcal/kg. Cabe mencionar que los residuos de jitomate casi duplican la humedad máxima del 15 % permitida en este tipo de biocombustibles (Tabla 4), por lo que se aplicó un proceso de deshidratación solar.

TABLA 3.

Poder calorífico de algunos materiales combustibles.

Fuente: Reyes [17].

MATERIAL	PODER CALORÍFICO (MJ/kg)
RESIDUOS DE JITOMATE	19.74
CARBÓN MINERAL	21
GAS LP	49
CASCARILLA DE ARROZ	15.8
PELLETS DE MADERA	17
FIBRA DE COCO	16.3



TABLA 4.

Composición química de los residuos de cultivo de jitomate.

Fuente: Reyes et al.[17].

COMPUESTO	PORCENTAJE POR CADA TON DE RESIDUO DE JITOMATE
HEMICELULOSA	14.2
CELULOSA	39.35
LIGNINA	12.25
PROMEDIO DE HUMEDAD	34.2

Balance energético

En función de la capacidad de producción de 3744.5 m³ en el invernadero, se estimó una generación de 2.92 toneladas de residuos por cada ciclo productivo, tomando en consideración la masa cuantificada de residuos. Tras los procesamientos de trituración y deshidratación descritos en la sección de Metodología, se obtuvo un total de 1.82 toneladas de pellets. Este tipo de biocombustible, además de ser una fuente de energía calorífica para el propio invernadero, funge como proveedor de dióxido de carbono para el mismo ciclo productivo.

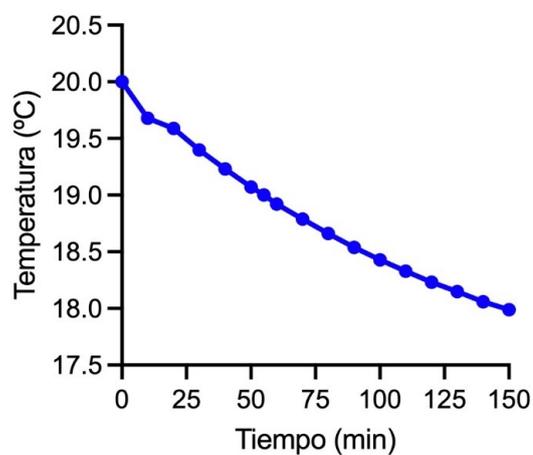
Una vez obtenidos los pellets, se calculó el flujo de calor requerido para elevar la temperatura en un rango de 3-5 °C en el interior del invernadero. Con esa finalidad, se partió de la valoración de la masa de aire en el espacio de estudio (aproximadamente 4841.74 kg); después, se determinó el flujo de calor por sustitución en la Ecuación 1. Al final, se llegó a la conclusión de que, para alcanzar un aumento de 3 °C, se requiere una masa de 3.15 kg de gas LP (poder calorífico de 49 000 kJ/kg) por cada grado/h, o 7.74 kg/h de pellets.

Los cálculos de transferencia de calor para alcanzar al equilibrio térmico interior y exterior revelaron que, a partir de las 2.5 horas, la temperatura cae por debajo de los requerimientos del cultivo (Figura 1). Por lo tanto, y como se había mencionado anteriormente, cada mes tiene una diferen-

cia en cuanto al volumen de pellets necesarios. A manera ilustrativa, en la Tabla 5 se presentan los datos de septiembre.

FIGURA 1.

Curva de la ecuación trazada a partir de la Ley de enfriamiento de Newton.



Para el cálculo de las variables en cada una de las ecuaciones fueron considerados los parámetros enlistados en la Tabla 5.

TABLA 5.

Datos calculados de GLP y pellets consumidos en el mes de septiembre.

En el mes de septiembre se consumieron aproximadamente 464.25 kg de las 1.82 toneladas totales de pellets. Se concluye que, en su conjunto, los 1821.6 kg producidos alcanzan a cubrir el 77 % de la necesidad energética del ciclo.

VARIABLE	VALOR	UNIDADES
MASA DE AIRE	4841.74	kg
CALOR ESPECÍFICO (c_p): AIRE	1.052	kJ/kg K
DELTA DE TEMPERATURA (ΔT)	4	K
CALOR	20374.03	kJ
CALOR ESPECÍFICO (c_p): PELLETS	19740	kJ/kg K
MASA DE PELLETS	1.03	kg
TIEMPO DE QUEMA	6	minutos
FLUJO DE PELLETS	10.32	kg/h
USO DIARIO	1.5	horas
MASA DE PELLETS POR DÍA	15.48	kg/día
MASA DE PELLETS POR MES	464.45	kg/mes
FLUJO DE GAS LP	4.16	kg/h



Viabilidad económica

Conforme a lo reportado por la Comisión Reguladora de Energía de México [18], el precio del gas LP en la comunidad de Amazcala consta de 1.251 dólares por kg. En consecuencia, el costo de calefacción por hora asciende a 5.21 dólares, es decir, 234 dólares mensuales. Por otra parte, de acuerdo con Martínez Guido *et al.* [19], la producción de pellets a partir de residuos orgánicos tiene un costo de 34 dólares por tonelada.

A partir de los valores mostrados en la Tabla 6 se infiere que la producción de cada kg de pellets cuesta 0.034 dólares, lo que equivale al 97 % menos del precio por cada kg de gas LP. Asimismo, se calcula que en caso de sustituir el 77 % de la demanda de energía con pellets, se tendría un ahorro del 71 % por ciclo productivo. No obstante, cabe destacar que solo es posible satisfacer el 77 % de la demanda energética del invernadero, debido a la limitante de la cantidad de residuos agrícolas generados.

TABLA 6.

Estimación económica.

VARIABLE	VALOR	UNIDADES
CANTIDAD DE PELLETS REQUERIDOS POR CICLO	2360	kg
PELLETS PRODUCIDOS	1821	kg
COSTO DE PELLETS PRODUCIDOS	61	dólares
PELLETS FALTANTES	539	kg
GAS LP COMPLEMENTARIO	217	kg
AHORRO TEÓRICO DE GAS LP	1189	dólares
COSTO DE GAS LP FALTANTE	271	dólares
AHORRO REAL POR CICLO	854	dólares
FLUJO DE GAS LP REQUERIDO POR CICLO	951	kg
FLUJO DE GAS LP CUBIERTO CON PELLETS	733	kg
PORCENTAJE CUBIERTO	77	%

Viabilidad ambiental

Como se mencionó anteriormente en la sección de Metodología, se llevó a cabo una evaluación ambiental mediante el estudio ACV [11], normado por la ISO-14040 [12]. El análisis de ciclo de vida compara el daño ambiental causado por ambas alternativas energéticas para generar una visión sobre las posibles ventajas de sustituir un combustible convencional como el gas LP. El alcance de la prueba (Figura 2) hace notar la disponibilidad de ambas fuentes de energía para mantener la temperatura del invernadero. En particular, el caso de los pellets producidos a partir de residuos de jitomate se considera un proceso cerrado: la biomasa residual de la producción primaria es quemada para el control de la temperatura interna; las emisiones resultantes son fijadas por el cultivo a través del proceso de fotosíntesis [20]. Cabe destacar que el uso de gas natural también genera emisiones perjudiciales que son liberadas a la atmósfera.

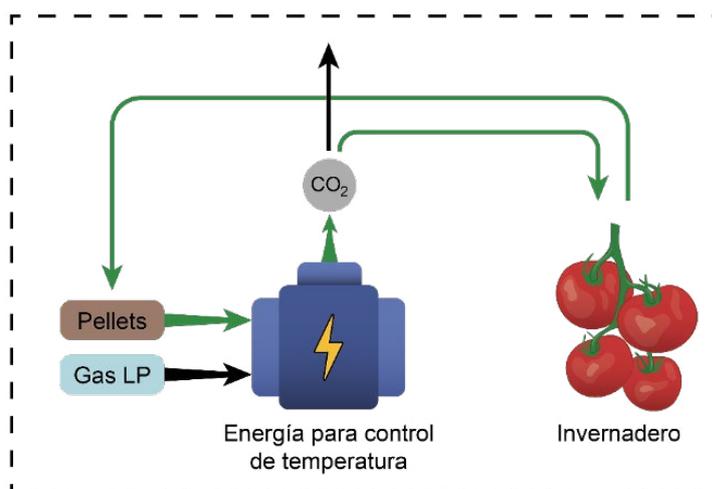


FIGURA 2.

Sistema delimitado para el ACV. En cuanto al estudio de caso, la unidad funcional empleada contaba con potencia de 1 kWh.

A partir de la Figura 2 es posible identificar los límites del sistema analizado. Para elaborar el inventario de emisiones de ambos sistemas se recurrió al modelo de gases de efecto invernadero, emisiones reguladas y uso de energía en diversas tecnologías (GREET®), diseñado en el Argonne National Laboratory [13]. En la Tabla 7 se cuantificaron las emisiones generadas por ambas fuentes (pellets y gas) en el control térmico del invernadero. Las cifras de emisiones aparecen enlistadas en kg por kWh. En la columna "Diferencia" se presenta la comparativa entre el porcentaje de emisiones generadas por la biomasa (pellets) y de gas LP.



TABLA 7.

Inventario de emisiones generadas por ambas fuentes de calor.

kg/kWh			
EMISIONES	BIOMASA	GAS LP	DIFERENCIA (%)
CO ₂ total	2.589×10^{-02}	3.523×10^{-01}	92.65
VOC	9.915×10^{-05}	5.252×10^{-05}	-88.79
CO	1.229×10^{-04}	3.508×10^{-04}	64.97
NO _x	2.156×10^{-04}	3.347×10^{-04}	35.58
PM ₁₀	3.413×10^{-05}	2.195×10^{-05}	-55.49
PM _{2.5}	1.988×10^{-05}	2.168×10^{-05}	8.30
SO _x	1.390×10^{-03}	7.054×10^{-05}	-1870.51
CH ₄	9.086×10^{-05}	1.049×10^{-03}	91.34
N ₂ O	1.718×10^{-04}	4.876×10^{-06}	-3423.38

VOC representa los compuestos orgánicos volátiles liberados a la atmósfera.

PM₁₀ representa las partículas de polvo, cenizas, hollín, metal, cemento o polen dispersas en la atmósfera cuyo diámetro aerodinámico es menor que 10 µm.

PM_{2.5} representa las partículas de polvo, cenizas, hollín, metal, cemento o polen dispersas en la atmósfera cuyo diámetro aerodinámico es 2.5 µm.

Para evaluar el impacto ambiental generado por ambas opciones de control térmico se aplicó el Eco-indicador 99 [21]. Dicha herramienta considera tres categorías de daño: salud humana, ecosistemas y recursos naturales; es importante señalar que los cálculos se realizaron tomando en cuenta la unidad funcional descrita previamente. En este sentido, en la categoría de daños a la salud por problemas respiratorios se contabilizaron 8.53×10^{-6} DALY¹ por el uso de pellets y 3.72×10^{-6} DALY por el de gas LP (Tabla 8). En la categoría de daños a la salud por cambio climático, se registraron 1.15×10^{-6} DALY debidos a la combustión de pellets y 4.81×10^{-6} por gas LP (Tabla 9). Por otro lado, en cuanto a los daños ocasionados al ecosistema (Tabla 10), la quema de pellets causó 5.22×10^{-7} PDF (unidades

¹ De acuerdo con la metodología del Eco-indicador 99, un DALY representa la cantidad estimada de días perdidos por el ser humano a causa de contaminantes, es decir los días restados a su vida promedio.

de daño por acidificación y eutrofización), y la de gas LP sumó 3.86×10^{-7} . En términos de daño a los recursos naturales, se produjeron 6.59×10^{-5} MJ residuales del uso de gas LP para la generación de 1 kWh de energía, mientras el impacto es nulo cuando se emplean pellets como fuente energética. El balance ambiental global evidencia que, por cada kWh suministrado por los pellets para mantener la temperatura dentro del invernadero, se obtiene 87 % menos eco-puntos, en comparación con el gas LP (Tabla 11). A tal efecto, el reciclaje de los residuos de jitomate tiene un impacto ambiental menos grave que el combustible convencional para la regulación térmica dentro del invernadero.

TABLA 8.

Categoría: daños respiratorios en humanos (DALY).

EMISIONES	SUSTANCIAS ORGÁNICAS		SUSTANCIAS INORGÁNICAS	
	PELLETS	GAS LP	PELLETS	GAS LP
VOC	4.15×10^{-09}	2.20×10^{-09}	-	-
CH ₄	7.55×10^{-11}	8.71×10^{-10}	-	-
NO _x	-	-	1.24×10^{-06}	1.93×10^{-06}
PM ₁₀	-	-	8.33×10^{-07}	5.36×10^{-07}
PM _{2.5}	-	-	9.04×10^{-07}	9.87×10^{-07}
SO _x	-	-	4.94×10^{-06}	2.50×10^{-07}
N ₂ O	-	-	6.10×10^{-07}	1.73×10^{-08}
TOTAL (POR TIPO DE SUSTANCIA)	4.23×10^{-09}	3.07×10^{-09}	8.52×10^{-06}	3.72×10^{-06}
TOTAL (GLOBAL)	8.53×10^{-06}	3.72×10^{-06}		

TABLA 9.

Categoría: daños a la salud humana por cambio climático (DALY).

EMISIONES	PELLETS	Gas LP
CO ₂ Total	3.52×10^{-07}	4.79×10^{-06}
CH ₄	2.60×10^{-08}	1.43×10^{-08}
N ₂ O	7.70×10^{-07}	6.63×10^{-11}
TOTAL	1.15×10^{-06}	4.81×10^{-06}



TABLA 10.

Categoría: daños a la calidad del ecosistema por acidificación y eutrofización (PDF).

EMISIONES	PELLETS	Gas LP
NO _x	2.39×10^{-07}	3.72×10^{-07}
SO _x	2.82×10^{-07}	1.43×10^{-08}
TOTAL	5.22×10^{-07}	3.86×10^{-07}

TABLA 11.

Impacto ambiental generado por cada alternativa energética (Eco-puntos).

FUENTE DE CALOR	PELLETS	Gas LP
Salud humana (DALY)	8.97×10^{-06}	8.52×10^{-06}
Calidad del ecosistema (PDF)	5.21×10^{-07}	3.85×10^{-07}
Recursos naturales (MJ residuales)	-	6.59×10^{-05}
Total (Eco-puntos)	9.49×10^{-06}	7.48×10^{-05}

Conclusiones

Como fue posible observar, los residuos agroindustriales son una materia prima beneficiosa en la fabricación de biocombustibles debido a su composición fisicoquímica y potencial energético. Asimismo, se identificó una reducción significativa en términos de impacto ambiental, lo que convierte a los desechos en fuentes energéticas sustentables, en comparación con su contraparte convencional. Adicionalmente, la disponibilidad de residuos orgánicos permite planificar su uso e integración como fuentes de energía alterna a las cadenas de suministro principales,

o incluso a otros procesos. En pos de una economía circular, la reintegración de los desperdicios agrícolas a su misma cadena productiva contribuye al alargamiento del ciclo de vida de los subproductos generados y residuos. Por último, al optar por este tipo de estrategias se reducen los costos de producción a largo plazo, lo que a su vez suscita una mayor ganancia para los productores.



Referencias

- [1] FAO. "Alimentación y agricultura sostenibles", Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, 2022. <https://www.fao.org/sustainability/background/es/>
- [2] G. Forkuor, W. Amponsah, P. Oteng-Darko, G. Osei, "Safeguarding food security through large-scale adoption of agricultural production technologies: The case of greenhouse farming in Ghana", *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 6, 2022, DOI: 10.1016/j.clet.2021.100384
- [3] I. Tsafaras, J. Campen, C. Stanghellini, H. Zwart, W. Voogt, K. Scheffers, A. Alharbi, K. Assaf, "Intelligent greenhouse design decreases water use for evaporative cooling in arid regions", *Agricultural Water Management*, vol. 250, 2021, DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106807
- [4] M. Naseer, T. Persson, I. Righini, C. Stanghellini, H. Maessen, M. Verheul, "Bio-economic evaluation of greenhouse designs for seasonal tomato production in Norway", *Biosystems Engineering*, vol. 212, pp 413-430, 2021, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2021.11.005
- [5] N. Katsoulas, A. Sapounas, F. Zwart, J. Dieleman, C. Stanghellini, "Reducing ventilation requirements in semi-closed greenhouses increases water use efficiency", *Agricultural Water Management*, vol. 156, pp 90-99, 2015, DOI: 10.1016/j.agwat.2015.04.003
- [6] U. Çakir, E. Şahin, "Using solar greenhouses in cold climates and evaluating optimum type according to sizing, position and location: A case study", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 117, pp 245-257, 2015, DOI: 10.1016/j.compag.2015.08.005
- [7] B. H. Vanthoor, J. C. Gazquez, J. J. Magan, M. N. Ruijs, E. Baeza, C. Stanghellini, E. J. van-Henten, P.H. de-Visser, "A methodology for model-based greenhouse design: Part 4, economic evaluation of different greenhouse designs: A Spanish case", *Biosystems Engineering*, vol. 111, pp. 336-349, 2012, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2011.12.008
- [8] A. Pakari, S. Ghani, "Evaluation of a novel greenhouse design for reduced cooling loads during the hot season in subtropical regions", *Solar Energy*, vol. 181, pp 234-242,

- 2019, DOI: [10.1016/j.sole-ner.2019.02.006](https://doi.org/10.1016/j.sole-ner.2019.02.006)
- [9] W. Hongkang, L. Li, W. Young, M. Fanjia, W. Haihua, N. A. Sigrimis, "Recurrent Neural Network Model for Prediction of Microclimate in Solar Greenhouse", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, pp. 790-795, 2018, DOI: [10.1016/j.ifacol.2018.08.099](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.099).
- [10] I. Dupuis, "Estimación de los residuos agrícolas generados en la isla de Tenerife resumen del estudio de GPA S.L. para el cabildo insular de Tenerife (No. 1)", *Servicio técnico de agricultura y desarrollo rural*, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1145/1067268.1067287>
- [11] E. Ruiz. "El análisis de ciclo de vida. Metodología de decisión y evaluación ambiental en el sector de la edificación", Tesis de grado. Universidad Politécnica de Valencia, 2016.
- [12] Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia, ISO 14040, International Standard Organization, 2021 <https://envira.es/es/iso-14040-principios-relacionados-gestion-ambiental/>
- [13] GREET® Model, The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies Model (2021). Argonne National Laboratory. <https://greet.es.anl.gov/>
- [14] Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. *México en cifras: Querétaro*, 2021. <https://inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?a-g=22#collapse-Resumen>
- [15] Weather Spark. *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Amazcala, México*. 2022. <https://es.weatherspark.com/y/5020/Clima-promedio-en-Amazcala-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- [16] Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, 2016. *Manual técnico del cultivo de tomate (Solanum Lycopersicum)*. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10921.pdf>
- [17] Y. Reyes, M. Arteaga, Y. Morejón, A. Fuentes, "Valoración del potencial energético de los residuos agroindustriales de tomate para su empleo como biocombustible", Carrillo, vol. 10(2), pp. 1-9, 2020. <https://www.redalyc.org/journal/5862/586263256006>
- [18] Comisión Reguladora de Energía. *Precios de gasolina, diésel y gas LP*, septiembre 2022. <https://www.gob.mx/cre/documentos/>



precios-maximos-aplica-
bles-de-gas-lp?idiom=es

- [19] S. I. Martínez, J. F. García, C. Gutiérrez, A. Dominguez, F. I. Gómez, J. M. Ponce, "The integration of pelletized agricultural residues into electricity grid: Perspectives from the human, environmental and economic aspects", *Journal of Cleaner Production*, vol. 321, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128932>
- [20] S. I. Martínez, J. F. García, C. Gutiérrez, F. I. Gómez, "Optimal agriculture residues revalorization as a biofuel alternative in electric power grids", *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 49, pp. 595-600, 2022. Doi: [10.1016/B978-0-323-85159-6.50099-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85159-6.50099-3)
- [21] M. Goedkoop, R. Spriensma, "The Eco-Indicator 99: A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment", PRé: Product Ecology Consultants, Países Bajos. https://pre-sustainability.com/legacy/download/EI99_annexe_v3.pdf