



Evaluación de emisiones de CO₂ y partículas finas en la incineración de biomasa de calabacita (*Cucurbita pepo* L. – Cucurbitaceae)

*Evaluation of CO₂ and particulate matter emissions from the incineration of calabacita (*Cucurbita pepo* L. - Cucurbitaceae)*

JORGE A. ALCALÁ JÁUREGUI¹, A. OCHOA ARRIAGA², E. MARTÍNEZ CARRETERO³,
A. NAVAS ROMERO^{3,4}, M. ONTIVERO³, M.F. FILIPPINI⁵, A.N. ROJAS VELÁZQUEZ¹,
O.I. GUILLÉN CASTILLO¹, A.Y. LARA IZAGUIRRE¹,
A. DUPLANCIC³ & F. VILLEGAS RODRIGUEZ¹

¹ Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Km 14.5
Carretera San Luis-Matehuala Apartado Postal 32 C.P.78321
Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P.

² Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

³ Geobotánica y Fitogeografía. IADIZA (CONICET)

⁴ Instituto de Ingeniería Química-Grupo Vinculado al PROBIEN (CONICET-UNCo), Facultad
de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, San Juan

⁵ Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo
jorge.alcala@uaslp.mx

ARK: <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s18527329/wviayjl94>

RESUMEN

Las actividades agropecuarias generan grandes cantidades de biomasa que en gran medida son quemadas en el campo. Este proceso conlleva impactos ambientales, principalmente las emisiones de gases efecto invernadero. El objetivo de este estudio fue cuantificar la biomasa y analizar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y partículas sólidas de 2,5 y 10 micras asociadas con el cultivo de plántulas de calabacita (*Cucurbita pepo* L.) en sustratos agrícolas. Se estimó la biomasa de las plántulas (hoja, tallo y raíz) y se incineraron a temperaturas en un rango de 50 a 450 °C, registrando las emisiones de CO₂ y partículas generadas. La biomasa total de las hojas presentó la mayor emisión promedio de CO₂ (758,3 ppm) y PM_{2,5} (327,9 µg/m³) y en tallo PM₁₀ (2449,3 µg/m³) superando los niveles de referencia dados para México y a nivel internacional. Las emisiones totales de PM_{2,5} y PM₁₀ también excedieron los límites permisibles. Los

resultados sugieren la necesidad de investigar la composición de biomasa en plántulas y sus emisiones para mitigar riesgos a la salud humana y a los ecosistemas.

ABSTRACT

Agricultural activities generate large amounts of biomass, which are largely burned in the field. This process has environmental impacts, mainly greenhouse gas emissions. The objective of this study was to quantify the biomass and analyze the emissions of carbon dioxide (CO₂) and solid particles of 2.5 and 10 microns associated with the cultivation of zucchini seedlings (Cucurbita pepo L.) in agricultural substrates. The biomass of the seedlings (leaf, stem and root) was estimated, and they were incinerated at temperatures ranging from 50 to 450 °C, recording the emissions of CO₂ and particles generated. The total biomass of the leaves presented the highest average emission of CO₂ (758,3 ppm) and PM_{2,5} (327,9 µg/m³), and in stem PM₁₀ (2449,3 µg/m³) exceeding the reference levels indicated for Mexico and at international level. Total emissions of PM_{2,5} and PM₁₀ also exceeded permissible limits. The results suggest the need to investigate seedling biomass composition and emissions to mitigate risks to human health and ecosystems.

Palabras clave: emisiones de CO₂, temperatura, impacto ambiental, Cucurbita pepo, biomasa

Keywords: CO₂ emissions, temperature, environmental impact, Cucurbita pepo, biomass

INTRODUCCIÓN

Las actividades agropecuarias generan una gran cantidad de biomasa que puede ser convertida en energía renovable; sin embargo, puede estar asociada a la generación de impactos ambientales principalmente emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y partículas contaminantes, lo que agrava el problema de la calidad del aire. Este impacto es particularmente relevante dado que la contaminación del aire causa anualmente aproximadamente siete millones de muertes en el mundo (Organización Mundial de la Salud, 2021, 2022), siendo la quema de biomasa uno de los principales contribuyentes en zonas rurales de países en desarrollo (Islam et al., 2022). Para Cole (2001), la biomasa consiste, principalmente, en carbono, oxígeno, hidrógeno, en menor medida de nitrógeno, azufre, ceniza y agua, dependiendo de la humedad relativa. La biomasa puede derivar de residuos forestales, agropecuarios, in-

dustriales y urbanos. Particularmente en las zonas rurales, la biomasa agrícola es una de las principales fuentes de energía y los residuos de biomasa sólida son el cuarto recurso energético después de la biomasa, el petróleo y el gas, proporcionando aproximadamente el 14% de las necesidades energéticas mundiales (Suman et al., 2021; Islam et al., 2022). La agricultura genera cantidades considerables de desechos (rastros): más del 60% como residuos de campo y entre 20% y 40% en desechos de proceso (BUN-CA, 2002). Gases como el CO, CO₂, HCs, N₂O y otras emisiones de efecto invernadero se asocian a la quema de biomasa agrícola (BUN-CA, 2002; Secretaría de Energía, 2008). En la combustión de estos residuos agrícolas se liberan no solo gases de efecto invernadero como el CO₂ y el N₂O, sino también otros compuestos peligrosos como el CO, los hidrocarburos y las partículas finas (PM_{2,5} y PM₁₀)

que afectan la salud humana y contribuyen al calentamiento global (Sung et al., 2019). Los agricultores eligen la quema por rentabilidad y tiempo, pero emiten varios tipos de contaminantes a la atmósfera, incluidos CH_4 , SO_x , NO_x , CO , CO_2 y partículas de diferentes tamaños. Para la combustión directa de los residuos sólidos se emplean quemadores de polvo, hornos, y calderas (BUN-CA, 2002; Suman et al., 2021). La emisión de gases de efecto invernadero por quema agrícola en los Estados Unidos representa el tercer lugar junto con China e India (Smith & Johnson, 2023). En la zona norte de América del Sur (NHSA: conformada por Colombia, Venezuela, norte de Brasil, Surinam, Guayana y Guayana), la biomasa quemada en la región proviene $87,60 \times 10^6$ ha entre 2001 y 2016, siendo un 57% por pastos, 23% sabanas, 8% sabanas arboladas, 8% suelos mixtos con cultivos y vegetación natural, 3% bosques perennes de latifoliadas, 1% en el resto de las coberturas asociados a la emisión de CO_2 , NO_2 , CO , NH_3 y carbón negro (Valencia et al., 2022). Este fenómeno es parte de la crisis ambiental global que se busca enfrentar a través de objetivos específicos como energía asequible y no contaminante, comunidades sostenibles y acciones climáticas (Naciones Unidas, 2018). Para la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico la preocupación de los impactos de la agricultura ha sido un referente para incluir la calidad del aire como parte de sus indicadores agroambientales (OECD, 2008; Organización de las Naciones Unidas, 2018). Según la Fundación Global Nature y SIGFITO (2021) y Zhao et al. (2024) en la mayoría de los productores la práctica más recurrente es la quema de los residuos agrar-

rios. En México se ha estimado para el año 2012 una generación de 52,104 millones de toneladas de biomasa agrícola, 728,846 toneladas de biomasa forestal incluyendo de origen tropical, coníferas y latifoliadas (SEMARNAT, 2020). La calabacita (*Cucurbita pepo*) es una hortaliza de gran relevancia agrícola y social en México. Para evaluar el crecimiento del cultivo algunas variables resultan de mayor interés: área foliar y materia seca por planta, con las que se determinó la tasa de crecimiento del cultivo, tasa absoluta de crecimiento, rendimiento del cultivo, peso, diámetro y largo del fruto (Aguilar-Carpio et al., 2022). En México se produce anualmente alrededor de 551 mil toneladas de calabacita, ubicándose como el séptimo país con mayor producción. Los principales estados productores son los estados de Sonora, Puebla, Sinaloa, Michoacán e Hidalgo (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024). Según el Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA, 2021) en el 2020 la producción total en la agricultura protegida fue de 46.708,8 ha y el cultivo de calabacita representó el 0,1% con 42,9 hectáreas, cuyo residuo se quema. El presente estudio tiene como objetivo evaluar la cantidad de CO_2 y partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10}) emitidas durante la combustión de residuos de plántulas de calabacita en diferentes condiciones de temperatura y humedad, como estrategia de evaluación de impacto ambiental de las actividades agrícolas.

MATERIAL Y MÉTODO

El trabajo se desarrolló en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de San Luis Potosí (MX) ubicado en el Ejido

Palma de la Cruz, municipio de Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México ubicado en las coordenadas 24°14'58"N y 100° 51'53"W.

Cosecha y preparación de muestras

Se seleccionó la calabacita de la variedad Larga Squash (*Cucurbita pepo*). Para evaluar la germinación, se colocaron 120 semillas comerciales certificadas "Rancho Los Molinos", 99% de pureza, en speedlings de 5x8 cavidades para la generación de plántula, se tuvo en cuenta el efecto de borde en la ubicación de los tratamientos, en diseño de bloques al azar. Cada cavidad tenía un volumen de 15 ml y fue rellena con sustrato de acuerdo con los siguientes tratamientos experimentales: T1. 50% Perlita 50% Peat moss, T2. 75% Peat Moss 25% Perlita y T3. 100% Peat moss. En cada tratamiento se aplicó 400 ml de agua de riego cuando se alcanzó el 80% de germinación. Se calculó el volumen total de agua aplicada (VTAA) y el volumen de agua lixiviada (VAL), y los parámetros fisicoquímicos: N (mg L^{-1}), P (mg L^{-1}), K (mg L^{-1}), Conductividad Eléctrica (CE en $\mu\text{S/cm}$), Sólidos Disueltos Totales (SDT en ppm), Calcio (ppm), Sodio (ppm), Nitratos (ppm). Estos parámetros fueron evaluados utilizando los medidores Environmental Sensor modelo 3001-SCY-PT, medidor multiparámetro "Hanna instruments" modelo HI9813-6 y los medidores de iones Horiba LAQUAtwin para calidad de agua. En la Figura 1 se muestran los elementos empleados en el ensayo.

Cosecha y preparación de muestras

El ensayo se desarrolló entre junio y julio del 2024. A los 16 días posterior-

es a la germinación, se cosecharon las plántulas. Las muestras se separaron en hoja, tallo y raíz, y se midieron las longitudes de cada parte (precisión de ± 0.1 cm) para evaluar el desarrollo por tratamiento (Zhao et al., 2021). Posteriormente las muestras fueron pesadas en fresco (mg/kg) utilizando una balanza analítica PGW 753i Adam Equipment (precisión 0.0001g). Para obtener el peso seco, las muestras fueron colocadas en estufa Riossa a 60° durante 48 horas y posteriormente vueltas a pesar.

Incineración y medición de emisiones

Para esta fase se consideraron 27 muestras incineradas derivadas de biomasa seca (9 por tratamiento). Para incinerar los materiales a 450 °C se emplearon crisoles de porcelana tarados (± 0.01 g de precisión). La temperatura fue incrementada en intervalos de 50°C hasta alcanzar 450°C, en un ambiente con circulación de aire y extracción controlada para evitar acumulación de gases. Cada medición se realizó en fracciones de temperaturas a los 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 y 450 °C, cada temperatura se mantuvo durante 5 minutos para garantizar la estabilidad de la combustión. Se realizaron mediciones previas de los parámetros a evaluar en la atmosfera natural y mediciones dentro y fuera de la mufla sin encender y encendida (desde los 50°C a 450°C) sin biomasa para hacer el ajuste de las emisiones reales. Fueron evaluadas las emisiones de CO₂, (ppm) partículas de 2,5 micras (ppm) y de 10 micras (ppm), humedad relativa (%) y temperatura (°C). Se empleó el equipo "Portable air quality monitor Blatn" y el "Dust Particle Counter Hti" (Yaeseul et al., 2019; Wang & Zhang, 2020). Las



Figura 1. Elementos empleados durante el proceso metodológico para la generación de biomasa de calabacita y estimación de emisión de CO_2 y partículas atmosféricas

Figure 1. Elements developed during the methodological process for the generation of zucchini biomass and estimation of CO_2 and atmospheric particle emissions

mediciones de CO_2 , partículas $\text{PM}_{2,5}$, y PM_{10} se registraron a intervalos de 30 segundos en cada temperatura objetivo. Para asegurar la precisión de las mediciones de gases y partículas, cada tratamiento se replicó cinco veces. Las mediciones se compararon con los mismos parámetros medidos en el ambiente y los datos de referencia de la United States Environmental Protection Agency (2024) y la Organización Mundial de la Salud (2021).

Análisis de datos

Los datos fueron procesados en el software Minitab[®] versión 16 realizando un análisis descriptivo de cada parámetro. Se empleó un análisis de correlación para examinar la relación entre las emisiones de gases (CO_2 , $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10}) y la composición de sustratos. Además, se

realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar la significancia de las diferencias en emisiones entre tratamientos y tipos de biomasa, con un nivel de confianza del 95% (Tukey, $p < 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Agua de riego

Durante los primeros 6 días de cultivo de las semillas se aplicó un volumen de riego de 2400 ml, con un volumen retenido de 1692 ml, volumen lixiviado de 708 ml y un porcentaje lixiviado en promedio de 29,5%. Estos resultados son consistentes con estudios previos, donde se ha demostrado que la proporción de lixiviación depende de la capacidad de retención de agua del sustrato y su composición (Hussain et al., 2020). La combinación de perlita y peat moss en los

sustratos usados favorece la retención de agua, lo cual es esencial para garantizar un desarrollo uniforme de las plántulas en condiciones controladas (Smith et al., 2021). Los parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua de riego fueron: N (48 mg.L⁻¹), P (58 mg.L⁻¹), K (116.5 mg.L⁻¹), NO₃ (265 ppm), Ca²⁺ (20,5 ppm), K⁺ (11 ppm), Na²⁺ (16,3 ppm), CE (636 µS/cm), pH (5,44), SDT (332 ppm) y temperatura (28,65°C). Entre 6 y 8 días la germinación fue del 90%. Estos valores son congruentes con los rangos de nutrientes recomendados para cultivos de rápido crecimiento, como *Cucurbita pepo*, para optimizar la biomasa (Kumar et al., 2022). La presencia de altos niveles de nitrato (265 ppm) podría haber influido en el desarrollo de la biomasa al promover un crecimiento vegetativo robusto (Zhao et al., 2021). Sin embargo, el bajo valor de pH (5,44) puede limitar la disponibilidad de ciertos nutrientes esenciales, lo cual es un factor a considerar en futuras aplicaciones de riego para ajustar la calidad del agua.

Estimación de biomasa (materia fresca y peso seco)

Las 30 plantas seleccionadas presentaron altura media de 28,33 cm, altura promedio del tallo de 13,95 cm y 9,92 cm de raíz. En la Figura 2 se muestran las variables medidas según tratamiento. La altura media total de planta (31,63±9,84 cm), altura del tallo (15,03±3,04 cm) y tamaño de raíz (13,13±6,9 cm) fueron mayores en las plantas cultivadas en el tratamiento T1. La biomasa total generada con el peso fresco siguió el orden: hoja>tallo>raíz, destacando 11,28±5,59 (hoja), mientras que en el peso seco total fue tallo>hoja>raíz con un valor mayor de 0,52±0,25 g (tallo). Estos resultados

respaldan la hipótesis de que la mezcla de Perlita-Peat moss favorece la aireación y el drenaje, proporcionando un entorno óptimo para el desarrollo radical y del tallo (Bustamante-García et al., 2016). La altura y desarrollo radicales mayores en el tratamiento T1 podrían estar relacionados con la capacidad del sustrato para retener nutrientes y agua, así como con la mayor oxigenación del suelo. Además, esto puede indicar que las hojas presentan un mayor contenido de agua que el tallo, lo cual es consistente con la función fisiológica de las hojas en la fotosíntesis y el intercambio gaseoso (Arteaga-Pérez et al., 2016). La mayor biomasa seca en el tallo refleja la acumulación de compuestos estructurales como la celulosa y la lignina, esenciales para el soporte de la planta y menos susceptibles a la pérdida de agua (Zhu et al., 2020).

Determinación de emisiones atmosféricas en el cultivo de calabacita.

Del análisis de correlación surgen 91 interacciones entre las variables evaluadas, de las cuales 18 fueron significativas por encima de una $r^2 \leq 0.70$. De estas destacan las emisiones entre las temperaturas de 50 °C a 150 °C ($r^2=0,957$) y 150 a 300 °C ($r^2=0,970$). Esto sugiere una relación directa entre el aumento de temperatura y la liberación de gases y partículas finas de la combustión de la biomasa (Chen et al., 2021). La temperatura ambiente durante el desarrollo de la incineración fue de 27,72±0,77 °C, con una máxima de 28,04 °C. El contenido de humedad relativa presentó una media de 58,20±2,27 y máxima de 59,48%.

El promedio de las emisiones de CO₂ de la quema de biomasa varió entre

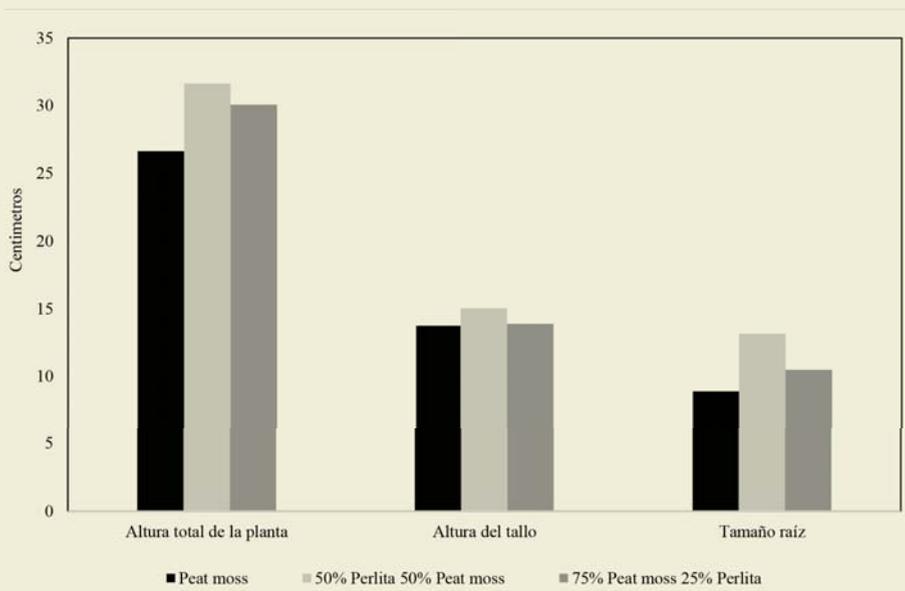


Figura 2. Valores medios de las variables agronómicas de las plantas de calabacita de acuerdo con los sustratos utilizados para el cultivo

Figure 2. Average measurements of the agronomic variables of the zucchini plants according to the substrates used for cultivation

281,4 hasta 455 ppm en las temperaturas de 50 a 450 °C, teniendo un mínimo de emisión de 5,7 ppm hasta un máximo de 1651 ppm. La concentración en la atmósfera durante los días del experimento promedió los 400 ppm. Las PM_{10} presentaron una media general entre 127 hasta 1639 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con valores mínimos de 0 hasta 7308 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En cuanto a las $PM_{2,5}$ el promedio osciló en 10,06 hasta 166,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con mínimas de emisión de 16,12 hasta un máximo de 967 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones de estas partículas fueron superiores en la atmósfera antes de la incineración con un promedio de 53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para las $PM_{2,5}$ y PM_{10} respectivamente. La distribución de tamaño de partícula, morfología y densidad son características físicas del material particulado, mientras que los compuestos orgánicos e inorgánicos,

metales y contaminantes primarios y secundarios son características químicas (Angulo et al., 2011). Islam et al. (2022) señalan que algunos índices de calidad del aire en emisiones entre los 168 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $PM_{2,5}$, se considera insalubre y se indica solo como advertencia, ya que la contaminación del aire puede alcanzar niveles significativamente superiores a 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, o incluso más peligrosos. Según datos del Inventario Nacional de Emisiones de México en 2020, las quemadas de campos agrícolas produjeron 67.309,81 toneladas de partículas en suspensión, es decir, aproximadamente el 20 % de las emisiones totales de $PM_{2,5}$ (Smith & Johnson, 2023). La biomasa es una fuente de energía que presenta gran heterogeneidad estructural anatómica y química, con baja densidad energética, alto contenido de humedad e higroscó-

picidad es hidrófila y con bajo poder calorífico (Bustamante-García et al., 2016).

En la Tabla 1 y Tabla 2 se presentan los resultados de las emisiones totales de CO₂ y de partículas registrados y sus relaciones estadísticas ($p \leq 0.05$). Las emisiones de CO₂ no tuvieron efecto significativo por tipo de material de la planta, presentando las mayores emisiones a razón de Hoja > Tallo > Raíz, destacando las 758,3 ppm a los 450 °C; sin embargo, algunos registros estuvieron por encima del nivel de condición buena de calidad del aire (400 a 700 ppm) (Tabla 1). En las emisiones totales de PM₁₀ (µg/m³) de acuerdo con la biomasa, no hubo diferencias significativas; la relación resultó: en Tallo > Raíz > Hoja, con niveles de 2449,3 µg/m³ a los 350 °C. Las emisiones totales de PM_{2,5} se dieron a razón de Hoja > Tallo > Raíz con la mayor emisión de 327,9 µg/m³ a los 350 °C,

En el caso de las emisiones se encontraron diferencias significativas a temperatura de incineración de 400 °C. De la misma forma, de acuerdo con la procedencia de la biomasa generada en los diferentes tratamientos, se encontró un efecto significativo en el material incinerado a los 350 °C en el T1. Esto destaca en la emisión individual de CO₂ con un máximo 454,94 ppm a 400 °C, PM_{2,5} presentó 166,78 µg/m³ a 250 °C y PM₁₀ con un máximo de 1638,57 µg/m³ a 250 °C (Tabla 1).

Considerando el origen de la biomasa, según los tratamientos de sustratos, las mayores emisiones totales de CO₂ fueron a razón de T1 > T3 > T2, teniendo la mayor emisión a los 400 °C con 828,5 ppm (Tabla 2). Para el caso de PM₁₀ las emisiones resultaron: T1 > T2 > T3 teniendo la mayor emisión a los 200 °C con 2638,6 µg/m³. En cuanto a las emisiones de PM_{2,5} fue-

ron a razón de T1 > T2 > T3 presentando su mayor emisión a los 350 °C con 427,7 µg/m³. Este comportamiento puede estar relacionado con la composición química diferencial de las partes de la planta, donde la hoja, rica en compuestos volátiles, muestra mayores emisiones de CO₂ a temperaturas elevadas (Bustamante-García et al., 2016). Los valores registrados superan lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud de exposición anual media de 10 µg/m³ de PM_{2,5} y 20 µg/m³ de PM₁₀ para disminuir los impactos a la salud (IQAir, 2018; World Health Organization, 2021).

En el caso del CO₂ en ocho temperaturas las emisiones derivadas de la quema de hojas estuvieron por encima de todos los registros teniendo la emisión mayor a las 450 °C de 758 ppm, salvo las emitidas a los 300 °C donde fue mayor la emisión en tallo. Respecto a las PM₁₀ en seis temperaturas fue mayor la emisión en el tallo, siendo la mayor emisión de 2449 µg/m³ a los 250 °C. De la misma forma, las PM_{2,5} sus mayores emisiones se presentaron en siete temperaturas (50, 100, 150, 200, 250, 300 y 400 °C) fueron mayores en tallo, sin embargo la mayor emisión de estas partículas fue en hoja con 279 µg/m³ a los 350 °C (Figura 3, 4, 5).

La generación de ceniza tuvo efecto significativo de acuerdo con el material de la biomasa, resultando el gradiente: hoja 0,132 g > tallo 0,09 g > raíz 0,06 g. Las diferencias en los pesos frescos y secos de cada parte del vegetal analizada responden a las diferencias estructurales, Arteaga-Pérez et al. (2016) indican que existe un 80% de material volátil y 20% de carbono fijo en la composición de la biomasa lignocelulósica. Además, pueden existir diferencias en la composición de diferentes materiales lignocelulósicos

como es el porcentaje de contenido de celulosa, de hemicelulosa y de lignina que pueden ser factores importantes en los procesos de combustión (Bustamante-García et al., 2016; Arteaga-Pérez et al., 2016). Esta relación entre composición y emisión ha sido documentada en otros estudios de combustión de biomasa que muestran una liberación gradual de CO₂ y partículas finas a medida que aumenta la temperatura (Grillo et al., 2020).

Una de las consecuencias asociadas a las prácticas agrícolas con la incineración de residuos vegetales es el aumento en la sensibilidad a la erosión y la pérdida de humedad del suelo. A su vez, puede incidir a una pérdida de materia orgánica del suelo (MOS) y de nutrientes a través de la dispersión o volatilización de partículas (Grillo et al., 2020). En cuanto a la sedimentación de PM_{2,5} y PM₁₀ se han encontrado promedios de 27 y 22 µg/m³ durante el período de incineración otoñal, respectivamente en regiones productoras de granos (Zhao et al., 2024). De la misma forma, Arteaga-Pérez et al., (2016) en los procesos termoquímicos como la torrefacción, pirólisis, carbonización y carbonización hidrotermal y pretratamiento por microondas, la temperatura es una variable que puede ajustar la composición y estructura de la biomasa o para descomponer la misma en fracciones más ligeras: líquidos, gases y sólidos. Esto da lugar a los picos de descomposición térmica de las fracciones de biomasa en donde interviene la torrefacción, hemicelulosa, celulosa y lignina.

Esto se pudo haber presentado en el comportamiento de los diferentes materiales evaluados como hoja, tallo y raíz a diferentes temperaturas (Tabla 1, Figura 3). La mayor emisión de CO₂ se presentó en la hoja con 758 ppm a los 450 °C, en

tallo la mayor emisión fue de 666 ppm a las 350 °C y en raíz fue de 229,7 ppm a los 450 °C, incidiendo la composición y estructura de los materiales. Arteaga-Pérez et al. (2016) indican que, en la evolución térmica de la torrefacción de la biomasa, se presenta una relación estrecha de la temperatura y las etapas de calentamiento, secado, postado, torrefacción y enfriamiento con respecto a la emisión de gases y otros compuestos en rangos graduales de (<50°C/min) y oscilaciones de 200 – 300 °C. Este tipo de contaminación es particularmente relevante en áreas rurales donde la quema de residuos vegetales es una práctica común, contribuyendo a la erosión del suelo y la pérdida de materia orgánica (Xu et al., 2023).

Nuestros resultados son consistentes con los reportes de Arteaga-Pérez et al. (2016), quienes observaron que la biomasa lignocelulósica, como el tallo, presenta un 80% de material volátil y un 20% de carbono fijo, lo cual afecta su comportamiento durante la incineración. Esta relación entre composición y emisión ha sido documentada en otros estudios de combustión de biomasa que muestran una liberación gradual de CO₂ y partículas finas a medida que aumenta la temperatura (Grillo et al., 2020).

En cuanto a las partículas PM₁₀ y PM_{2,5}, nuestros resultados coinciden con estudios recientes que señalan un aumento en la precipitación de estas partículas durante la quema de biomasa agrícola en periodos otoñales, especialmente en regiones de alta producción agrícola (Zhao et al., 2024). Además, se destaca la importancia de la temperatura de combustión, ya que temperaturas superiores a 350°C incrementan significativamente las emisiones de CO₂ y partículas. Este

Tabla 1. Relación general de emisiones de CO₂ y partículas atmosféricas derivadas de la incineración de la biomasa de *C. pepo* a diferentes temperaturas y criterios origen (Tukey, p≤0,05, n=27)
 Table 1. General relationship of CO₂ and atmospheric particle emissions derived from the incineration of *C. pepo* biomass at different temperatures and origin criteria (Tukey, p≤0.05, n=27)

Temperatura de incineración °C		50	100	150	200	250	300	350	400	450
Criterio		50	100	150	200	250	300	350	400	450
Emisiones Totales CO ₂ (ppm)										
Material										
Hoja		392,9a	699,6a	380,7a	398,3a	445,4a	535,2a	637,4a	746,9a	758,3a
Tallo		268,5a	276,7a	277,2a	286,1a	310,9a	398,5a	415,8a	405,9a	361,4a
Raíz		182,7a	185,7a	186,3a	183,3a	193a	204,0a	213,0a	212,0a	229,7a
Emisiones Totales PM ₁₀ (µg/m ³)										
Hoja		63,0a	44,8a	44,8a	95,0a	89,3a	21,5a	211,84a	18,5a	933,1a
Tallo		354,2a	318,4a	497,7a	2153,57a	2449,3a	1082,1a	406,3a	341,6a	181,2a
Raíz		8,3a	13,0a	10,82a	477,2a	2376,9a	48,92a	36,3a	21,7a	370,3a
Emisiones Totales PM _{2,5} (µg/m ³)										
Hoja		7,9a	9,0a	8,5a	49,8a	123,3a	26,0a	327,9a	9,7a	278,6a
Tallo		19,4a	17,5a	150,5a	207,7a	204,6a	155,1a	112,5a	43,7a	33,5a
Raíz		4,0a	3,6a	3,0a	136,6a	172,3a	7,6a	5,1a	3,5a	113,3a
Emisión de la biomasa total										
CO ₂ ppm		281,38a	387,35a	281,41a	289,22a	316,44a	379,26a	422,08a	454,94a	449,78a
PM ₁₀ µg/m ³		141,86a	126,94a	184,36a	908,61a	1638,57a	384,21a	218,2a	127,31ab	494,87a
PM _{2,5} µg/m ³		10,47a	10,06a	54,0a	131,43a	166,78a	62,95a	148,55a	19,02b	141,87a

Tabla 2. Relación general de emisiones de CO₂ y partículas atmosféricas derivadas de la incineración de la biomasa de *C. pepo* a diferentes temperaturas y tratamiento (Tukey, p≤0.05, n=27)
 Table 2. General relationship of CO₂ and atmospheric particle emissions derived from the incineration of *C. pepo* biomass at different temperatures and treatment (Tukey, p≤0.05, n=27)

Criterio	Temperatura de incineración °C								
	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Tratamiento origen de la biomasa									
Emisiones Totales CO ₂ (ppm)									
T1 50% Perlita 50% Peat Moss	529,1a	859,1a	537,2a	553,9a	599,7a	735,1a	808,4a	828,5a	776,3a
T2 75% Peat Moss 25% Perlita	145,4a	137,3a	139,6a	144,0a	162,8a	191,4a	221,5a	267,2a	285,1a
T3 100% Peat Moss	169,7a	165,7a	167,4a	169,8a	186,9a	211,3a	236,4a	269,2a	287,9a
Emisiones Totales PM ₁₀ (µg/m ³)									
T1 50% Perlita 50% Peat Moss	374,4a	340,8a	525,3a	2638,6a	2467,1a	1092,6a	425,9a	353,4a	204,0a
T2 75% Peat Moss 25% Perlita	27,5a	20,2a	10,0a	15,5a	2340,1a	9,6a	113,5a	12,28a	139,4a
T3 100% Peat Moss	23,5a	19,7a	17,9a	71,6a	108,4a	50,25a	115,0a	16,21a	1141,1a
Emisiones Totales PM _{2.5} (µg/m ³)									
T1 50% Perlita 50% Peat Moss	24,2a	23,4a	156,6a	266,0a	208,4a	163,5a	427,7a	38,1a	61,6a
T2 75% Peat Moss 25% Perlita	3,2a	3,0a	2,3a	47,3a	167,9a	12,5a	6,6a	7,0a	188,0a
T3 100% Peat Moss	3,9a	3,6a	2,9a	80,9a	124,0a	12,7a	11,1a	11,8a	175,8a

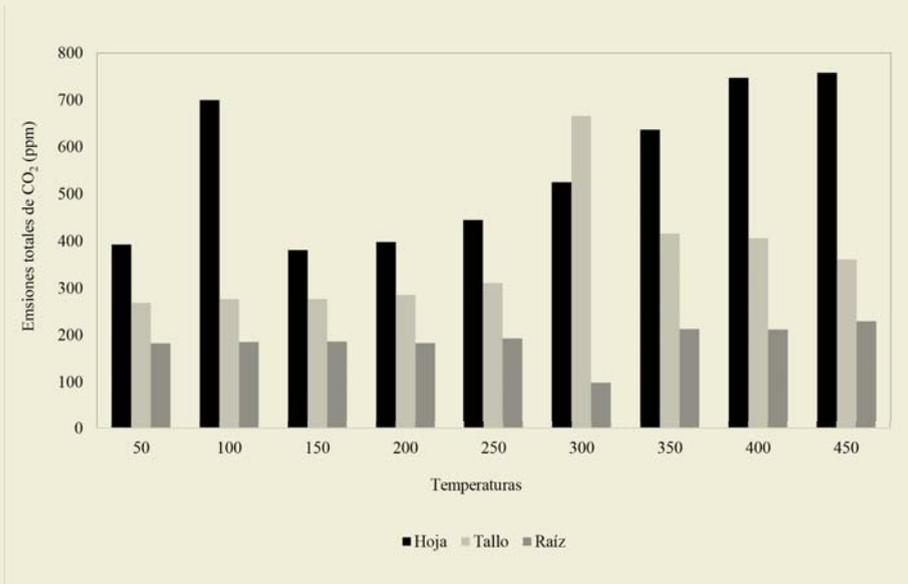


Figura 3. Relación de emisiones totales de CO₂ de la biomasa de la planta de *C. pepo* (hoja, tallo y raíz) de acuerdo con las temperaturas de incineración

Figure 3. Ratio of total CO₂ emissions from *C. pepo* plant biomass (leaf, stem and root) according to incineration temperatures

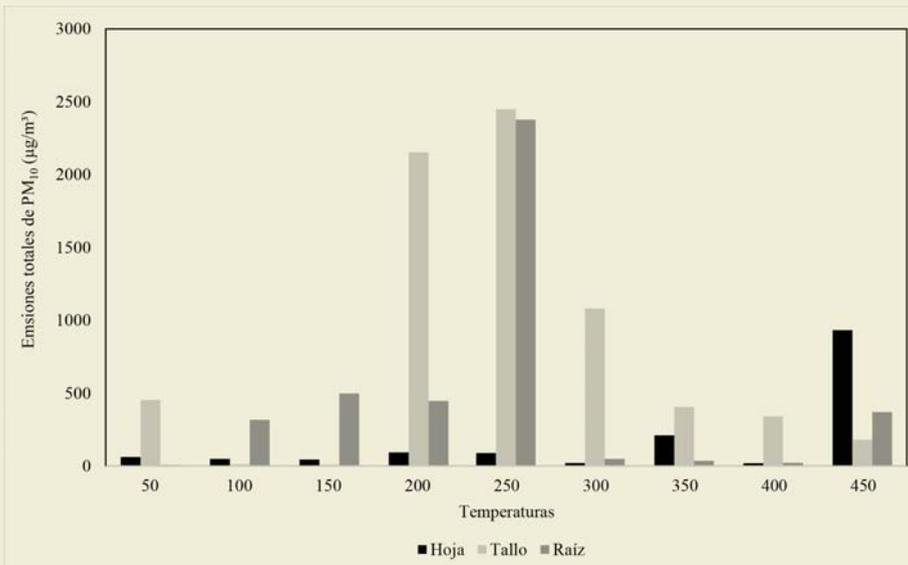


Figura 4. Relación de emisiones totales de PM₁₀ de la biomasa de la planta de *C. pepo* (hoja, tallo y raíz) de acuerdo con las temperaturas de incineración

Figure 4. Ratio of total PM₁₀ emissions from *C. pepo* plant biomass (leaf, stem and root) according to incineration temperatures

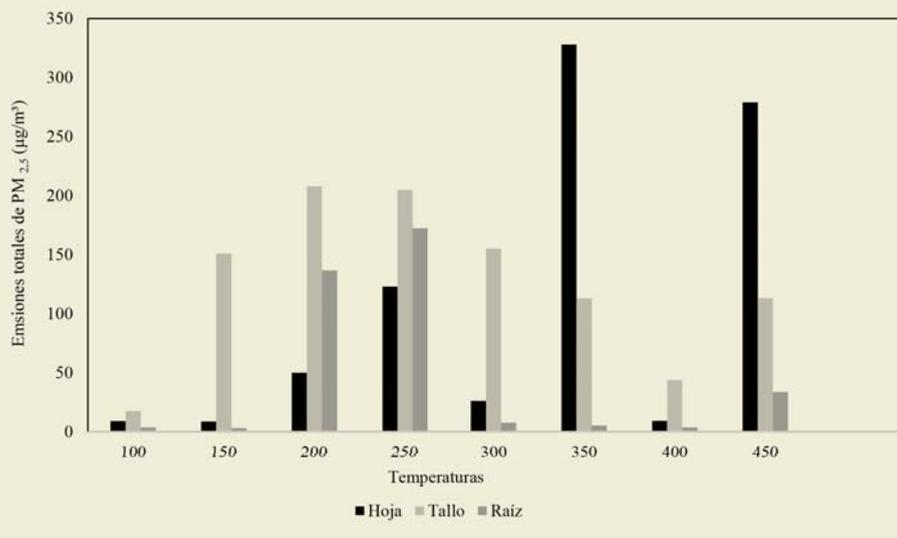


Figura 5. Relación de emisiones totales de PM_{2,5} de la biomasa de la planta de *C. pepo* (hoja, tallo y raíz) de acuerdo con las temperaturas de incineración

Figure 5. Ratio of total PM_{2,5} emissions from *C. pepo* plant biomass (leaf, stem and root) according to incineration temperatures

hallazgo es relevante para el manejo de prácticas agrícolas que utilizan la incineración, ya que el control de la temperatura podría minimizar el impacto ambiental. Bustamante-García et al. (2016) sugieren que la composición de la biomasa y la temperatura de incineración afectan directamente las emisiones de compuestos volátiles, indicando que materiales como la hoja presentan mayor emisión de CO₂ debido a su contenido de compuestos fácilmente combustibles.

CONCLUSIONES

La evaluación de las emisiones de CO₂, PM_{2,5} y PM₁₀ en la biomasa de *C. pepo* contribuyen al estudio de los efectos de la generación de gases efecto invernadero para los sistemas de producción de hortalizas. La incineración de biomasa de calabacita (*Cucurbita pepo* L.) bajo di-

ferentes condiciones de sustrato y temperatura produce emisiones significativas de CO₂ y partículas finas (PM₁₀ y PM_{2,5}). Se determinó que las emisiones de CO₂ y partículas por incineración de hoja, tallo y raíz, estuvieron por encima de límites máximos permisibles por organismos internacionales, lo que resalta la necesidad de regulaciones más estrictas para mitigar su impacto. La composición del sustrato y la parte de la planta quemada (hoja, tallo o raíz) influyen notablemente en las cantidades de biomasa generada y en el perfil de emisión, destacando que los tratamientos con perlita y peat moss en proporciones iguales (T1) favorecieron un mayor crecimiento y retención de biomasa. A temperaturas superiores a 350 °C, las emisiones de partículas finas y CO₂ alcanzaron sus máximos niveles, con las hojas produciendo mayores cantidades de CO₂ debido a

su contenido de compuestos volátiles, mientras que el tallo y la raíz mostraron un comportamiento de combustión más sostenido, atribuible a su mayor contenido de lignina y celulosa. Es necesario estudiar su variación temporal considerando las diferentes etapas fenológicas.

Los resultados obtenidos en este estudio no sólo subrayan el impacto ambiental de la quema de residuos vegetales, práctica común en muchas regiones agrícolas, sino que también resaltan la importancia de controlar la temperatura y el tipo de biomasa para minimizar las emisiones contaminantes. Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que indican que la incineración de biomasa agrícola contribuye significativamente a los niveles de partículas finas en el aire, afectando la calidad del aire y la salud pública en zonas rurales. Las emisiones de CO₂ derivadas de la quema de biomasa también deben considerarse dentro de las estrategias de mitigación del cambio climático, dado su impacto en el aumento de gases de efecto invernadero.

Estos hallazgos refuerzan la importancia de adoptar estrategias alternativas para la gestión de residuos agrícolas, tales como el compostaje, la producción de biocarbón o el aprovechamiento energético mediante tecnologías más eficientes, clave para el desarrollo de políticas de mitigación del cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

ADMINISTRACIÓN NACIONAL DE AERONÁUTICA Y DEL ESPACIO. Dióxido de Carbono, 2024. NASA. Dióxido de carbono | Signos vitales – Climate Change: Vital Signs of the Planet (nasa.gov)

- AGUILAR-CARPIO, C., Y.F. CERVANTES-ADAME, P.J. SORZA-AGUILAR & J.A.S. ESCALANTE-ESTRADA, 2022. Crecimiento, rendimiento y rentabilidad de calabacita (*Cucurbita pepo* L.) fertilizada con fuentes químicas y biológicas. *Terra Latinoamericana* 40, e1059. Epub 13 de junio de 2022. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1059>
- ANGULO, L.C., J. HUERTAS G. & RESTREPO, 2011. Caracterización de Partículas Suspensas (PST) y Partículas Respirables (PM10) producidas en Áreas de Explotación Carbonífera a Cielo Abierto. *Información tecnológica* 22 (4) 23-34.
- ARTEAGA-PÉREZ, L.E., C.G. SEGURA & K.D. SANTANA, 2016. Procesos de torrefacción para valorización de residuos lignocelulósicos. Análisis de posibles tecnologías de aplicación en Sudamérica. *Afinidad* 73: 60-68.
- BUNCA, 2002. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. *Bio Nica*. <http://www.bio-nica.info/Biblioteca/BUNCA-2002Biomasa.pdf>
- BUSTAMANTE GARCÍA, V., A. CARRILLO PARRA, J.A. PRIETO RUÍZ, J.J. CORRAL-RIVAS & J.C. HERNÁNDEZ DÍAZ, 2016. Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Revista mexicana de ciencias forestales* 7 (38): 5-23.
- CEDRSSA, 2021. Residuos plásticos en la agricultura, caso México. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. Cámara de Diputados. LXV Legislatura.
- CHEN, J., LI, C., RISTOVSKI, Z., MILIC, A., GU, Y., ISLAM, M. S., WANG, S., HAO, J., ZHANG, H., HE, C., GUO, H., FU, H., MILJEVIC, B., MORAWSKA, L., THAI, P., LAM, Y. F., PEREIRA, G., DING, A., HUANG, X., & DUMKA, U. C. (2017). A review of biomass burning: Emissions and impacts on air quality, health and climate in China. *The Science of the total environment* 579: 1000–1034.

- COLE, J., 2001. Biomass Burding. Earth observatory. NASA. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/BiomassBurning>
- FUNDACIÓN GLOBAL NATURE & SIG-FITO, 2021. Guía para la gestión de los residuos agrarios. Fundación Global Nature. <https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2021/07/Guia-Residuos-Agrarios.pdf>
- GRILLO, G., S. TABASSO, G. CRAVOTTO & T. VAN REE, 2020. Burning Biomass: Environmental Impact on the Soil. In: Mammino, L. (eds), Biomass Burning in Sub-Saharan Africa. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0808-2_2
- IQAIR, 2018. AIR VISUAL. World Air Quality Report. Region & City PM2.5 Ranking. Region & City PM2.5 Ranking. world-air-quality-report-2018-en.pdf
- ISLAM, N., NOOR-E-SADMAN, M. ISLAM & M. HASAN, 2022. Air Quality Monitoring of Bangladesh (AQM): Data Driven Analysis System. In: Proceedings of the 17th International Conference on Software Technologies - ICSOFT; ISBN 978-989-758-588-3; ISSN 2184-2833, SciTePress: 205-212.
- NACIONES UNIDAS, 2018. La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. CEPAL.
- OECD, 2008. Desempeño Ambiental la Agricultura desde 1990; Reporte Principal, Paris, Francia.
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, 2021. Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: materia particulada (MP2.5 y MP10), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono: resumen ejecutivo. Organización Mundial de la Salud. <https://iris.who.int/handle/10665/346062>. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS, 2018. La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago.
- SECRETARÍA DE ENERGÍA, 2008. Energías Renovables. Energía Biomasa. Coordinación de Energías Renovables. Dirección Nacional de Promoción. Subsecretaría de Energía Eléctrica. República Argentina.
- SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, 2024. Producción y cultivo de calabacita: Una guía para productores. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/produccion-y-cultivo-de-calabacita-una-guia-para-productores?idiom=es>
- SEMARNAT, 2020. Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos. Primera edición, mayo 2020. www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf
- SMITH, J. & L. JOHNSON, 2023. Review of agricultural biomass burning and its impact on air quality in the continental United States of America. Environmental Science Journal 45(3): 123-145.
- SUMAN, S., A. MOHAN YADAV, N. TOMAR & A. BHUSHAN, 2021. Combustion Characteristics and Behaviour of Agricultural Biomass: A Short Review. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.91398
- SUNG, Y., S. LEE, Y. KIM & H. PARK, 2019. Development of a smart air quality monitoring system and its operation. Asian Journal of Atmospheric Environment (AJAE) 13 (1): 30-38.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2024. National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for PM.
- VALENCIA, G.M., J.A. ANAYA & F.J. CARO-LOPERA, F.J., 2022. Bottom-up estimates of atmospheric emissions of CO₂, NO₂, CO, NH₃, and Black Carbon, generated by biomass burning in the north of South Ame-

rica. Revista De Teledetección (59): 23–46.

WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2021. global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. <https://iris.who.int/handle/10665/345329>

XU, Y., Z. HUANG, J. YE & J. ZHENG, 2023. Hourly emissions of air pollutants and greenhouse gases from open biomass burning in China during 2016-2020. *Scientific data* 10(1): 629.

YAESEUL S, L. SEUNGMIN, K. YEONKYUNG & P. HANBAI, 2019). Development of a Smart Air Quality Monitoring System and its Operation *Korea Environmental Technology* 13 (1): 30-38.

ZHAO, K., X. TIAN, W. LAI & S. XU, 2024. Agricultural production and air pollution: An investigation on crop straw fires. *PLoS ONE* 19(5): e0303830.

Recibido: 09/2024
Aceptado: 12/2024