

Composición química del digestato líquido proveniente de digestión anaerobia de residuo de cosecha y su efecto sobre el cultivo de tomate

Chemical composition of liquid digestate from a crop residue anaerobic digestion and its effect on tomato crop

Dania Carolina Uvario-Macías¹, Eduardo Salcedo-Pérez^{1*}, Silvia Mónica Avilés-Marín², Paola Andrea Palmeros-Suárez¹, César Bonifacio Ramírez-López¹, Juan Carlos Pizano-Andrade¹

¹ Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA), Universidad de Guadalajara. Carretera a Nogales, km 15,5, Predio Las Agujas, Zapopan. Jalisco, México.

² Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California, México.

RESUMEN

En la actualidad se han propuesto diferentes alternativas para aprovechar y valorizar los residuos de la industria agrícola, entre las cuales se encuentra la digestión anaerobia que permite generar dos subproductos, uno líquido llamado biol y otro sólido (biosol). El biol contiene compuestos químicamente similares a los reguladores de crecimiento vegetal y el biosol se emplea como abono orgánico. Además, el biol se considera suplemento de la nutrición vegetal y mejorador de suelo. Por lo que el objetivo del trabajo fue caracterizar químicamente un biol obtenido de la digestión anaerobia de residuos de cosecha de tomate y estiércol bovino a través de cromatografía en placa fina y GC-MS, así como evaluar su efecto sobre el cultivo de tomate usando concentraciones de 5 y 10 % aplicadas de forma foliar y en drench. Se identificó que el biol contenía una alta concentración de giberelinas (432.03 µg/mL) y la presencia de alcaloides y saponinas. Se encontró también en su composición silicato de metilo, ácido láurico y D-limoneno. La aplicación de biol tanto al 5 y 10 % favoreció el crecimiento de las plantas en comparación a los controles.

Palabras clave: Biol, Biosol, residuos vegetales, estiércol bovino, *Solanum lycopersicum*.

ABSTRACT

Currently, different alternatives have been proposed to take advantage of and valorize agricultural industry residues, among which is anaerobic digestion, which allows the generation of digestates of liquid (bioslurry) and solid (biosol) composition. Bioslurry is also considered a plant nutrition supplement and soil enhancer. Therefore, the objective of this study was to chemically characterize a bioslurry obtained from the anaerobic digestion of tomato crop residues and bovine manure using thin-plate chromatography and GC-MS, as well as to evaluate its effect on tomato crops using concentrations of 5 % and 10 % applied foliarly and in drench. It was identified that bioslurry contained a high concentration of gibberellins (432.03 µg/mL) and the presence of alkaloids and saponins. Methyl silicate, lauric acid and

D-limonene were also found in its composition. Application of bioslurry at both 5 % and 10 % levels favored plant growth compared to controls.

Keywords: Bioslurry, Biosol, plant residues, bovine manure, *Solanum lycopersicum*.

INTRODUCCIÓN

La gestión sustentable de residuos es uno de los principales desafíos medioambientales que enfrentan las sociedades actuales, a la que no están ajenos los sistemas productivos agroalimentarios (Mahajan, 2023). Es por ello, la necesidad de encontrar alternativas que permitan aprovechar y valorizar estos materiales de forma amigable al ambiente y sean económicamente viables (Domínguez *et al.*, 2019). En este sentido, la economía circular es un planteamiento en el cual, los residuos, subproductos y otros materiales derivados de un sistema de producción son aprovechados en el mismo sistema o forman parte como materia prima de otro sistema de producción, otorgándoles un valor nuevamente (Negrete-Cardoso *et al.*, 2022).

El sistema de producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) genera una gran cantidad de biomasa residual derivada de su producción agrícola, llegando a considerarse en un serio problema logístico y ambiental para los productores (Castro-Rivera *et al.*, 2020). En México, no se cuenta con datos relacionados con la biomasa residual generada por el cultivo de tomate a nivel nacional, mucho menos el destino de dichos residuos. Sin embargo, debido a la importancia de conocer estos datos, se cuantificó la cantidad de biomasa residual fresca (tallos, hojas y frutos de rezaga) que se genera en una hectárea de tomate. En agricultura protegida, se generan 40 ton/ha en invernadero, mientras que a cielo abierto es de 13 ton/ha. Por otro lado, se estima que en México la superficie de producción de tomate a cielo abierto fue de 33,500 ha y en agricultura protegida de 16,000 ha de acuerdo con el SIAP (2023). Con los datos anteriores, se encontró que la generación nacional de biomasa residual del cultivo de tomate es cerca de 500 mil ton en cielo abierto y más de 600 mil toneladas en agricultura protegida para cada ciclo pro-

*Autor para correspondencia: Eduardo Salcedo-Pérez
Correo-e: eduardo.salcedo@academicos.udg.mx

Recibido: 20 de agosto de 2024

Aceptado: 18 de agosto de 2025

Publicado: 18 de septiembre de 2025

ductivo. Estos residuos requieren de una gestión adecuada que evite contaminación ambiental, pues en su mayoría son quemados a cielo abierto, o bien, se depositan cerca de las áreas de producción, generando problemas fitosanitarios (Almeida *et al.*, 2024).

Por lo anterior se propone la digestión anaerobia como una alternativa para manejo de la biomasa residual de los cultivos, mediante una transformación microbiana que permita obtener subproductos con potencial aprovechamiento agrícola (Marconi y Rosa, 2024). La digestión anaerobia se considera un proceso natural de descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno, donde se eliminan los agentes de infección (Palermi *et al.*, 2021) en la cual los productos obtenidos son el biogás generado durante el proceso, un digestato líquido llamado biol y un digestato sólido conocido como biosol que son utilizados como bioabonos y que están libres de patógenos (Cabos *et al.*, 2019; Lim *et al.*, 2020). El biol se puede usar asperjado al follaje, y la parte sólida (biosol) puede ser empleada como mejorador de suelo (Vega *et al.*, 2022).

De acuerdo con Richard *et al.*, (2019), durante la digestión anaeróbica intervienen diferentes grupos microbianos, de manera coordinada, secuencial y compleja, transformando la materia orgánica presente en los materiales residuales (lodos, biomasa vegetal y estiércoles), hasta obtener los productos finales del proceso (gas y digestatos). Actualmente de este proceso se conocen las siguientes fases o etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Westernholm y Schnürer, 2019).

Lu *et al.* (2019), observaron en bioles provenientes de diferentes estiércoles, la presencia de compuestos bioactivos como metabolitos secundarios, además de reportarse en algunos casos, que contenían compuestos con actividad antifúngica (López-Dávila *et al.*, 2017; Lu *et al.*, 2018). Sin embargo, aún no se ha reportado la determinación de este tipo de compuestos en un biol donde se usen dos tipos de biomasa en la digestión anaerobia, en este caso residuos de cosecha de tomate y estiércol de bovino, es por ello que el objetivo de este trabajo fue determinar la presencia de compuestos similares a los reguladores de crecimiento vegetal en el biol, así como su composición química nutricional e inocuidad para evaluar sus efectos en un cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero, apoyando así a la economía circular de este producto de gran importancia en México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Producción y obtención del biol y biosol

Para la producción del biol se utilizaron dos tipos de biodigestores; el primero fue un prototipo de 200 L para establecer los días del proceso. Además de un Biodigestor GEOBOLSA® fabricado con geomembrana de polietileno con capacidad de 10 m³ ubicados en Ojocaliente, Zacatecas. Se colectaron muestras de biomasa residual del cultivo de tomate (tallos y hojas), eliminando desechos plásticos de rafia y anillos. Posteriormente, se molieron hasta obtener partículas menores a 3 mm (utilizando un molino de martillos empleado

para la obtención de paja y rastrojo). Al igual que la biomasa de tomate, el estiércol fresco se obtuvo de un potrero con ganado bovino de engorda en la comunidad de Ojocaliente, Zacatecas.

El sustrato para la digestión se elaboró con una mezcla con las siguientes proporciones 1:1:3 en % (peso: peso: volumen) con la biomasa residual de tomate, estiércol fresco y agua respectivamente (Castro-Rivera *et al.*, 2020). Cada uno de los biodigestores se alimentó al 75 % de su capacidad (Herrero, 2008). La colecta para la caracterización del biol (líquido) y biosol (sólido) se realizó a los 40 días después de haber empezado el proceso de digestión anaerobia (Castro-Rivera *et al.*, 2020). El biosol solo fue caracterizado en el contenido mineral.

Contenido de minerales

Las muestras del biol y biosol sin proceso previo, fueron sometidas a un análisis de contenido de minerales por espectrofotómetro de absorción atómica (PinAAcle™ 900F AA), empleando soluciones patrones y construyendo curvas de calibración (Skoog *et al.*, 2018), posteriormente se compararon con la lectura de las muestras para determinar los siguientes elementos: potasio (K), magnesio (Mg), calcio (Ca), sodio (Na), cobre (Cu), hierro (Fe), Zinc (Zn) y molibdeno (Mn) (HACH, 2017).

Análisis colorimétrico para determinación de giberelinas y auxinas

Para determinar la concentración de giberelinas en el biol, se preparó una solución madre con una concentración de 1 mg/ml de ácido giberélico (Sigma-Aldrich®), para obtener una curva de calibración de la cual se prepararon diluciones (100, 200, 300, 400, 500 µl) por triplicado. La prueba se realizó con el reactivo folin-ciocalteu (1:1) v/v a 60 minutos a baño María y leídas a 780 nm en un espectrofotómetro marca JENWAY modelo 7305 (Celis y Gallardo, 2008). Se determinó la concentración de giberelinas en el biol puro, y en diluciones del 5 y 10 % usando la ecuación de la recta obtenida por la curva de calibración ($R^2 = 0.9754$).

Para determinar la concentración de auxinas, se prepararon diluciones seriadas por triplicado para la obtención de una curva de calibración (100, 200, 300, 400, 500 µl) a partir de una solución madre concentrada con 1 mg/mL de ácido indolacético (Sigma-Aldrich®), de acuerdo con la metodología de Celis y Gallardo (2008). Se usó el reactivo de Salkowski (1:2) v/v. La reacción se incubó por 30 min a temperatura ambiente y las muestras fueron leídas a 530 nm en un espectrofotómetro marca JENWAY modelo 7305, obteniendo una $R^2 = 0.9838$, determinando la concentración de auxinas presentes en el biol. puro, y en diluciones del 5 y 10 %.

Tamizaje fitoquímico

Mediante las técnicas reportadas por Pujol *et al.* (2020) se realizó la identificación cualitativa de los metabolitos secundarios y carbohidratos presentes en el biol, a través de un tamizaje fitoquímico empleando pruebas requeridas

para cada familia de compuestos; Wagner (alcaloides), Mayer (alcaloides), ensayo de espuma (saponinas), cloruro férrico (taninos), gelatina al 1 % (taninos), tolueno/NaOH 5 % (antroquinonas), Ac. Mg (naftoquinonas) y Molish (carbohidratos).

Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MS)

Para determinar la presencia de diferentes compuestos químicos en el biol se llevó a cabo una cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. Se utilizó un equipo marca Hewlett Packard modelo 5890 Serie II. Cromatógrafo de gases Plus equipado con un detector de masas Hewlett Packard modelo 5989B (70 eV de entrada directa) y una columna capilar no polar HP-5 MS ((5-fenil metilpolisiloxano) (30 m x 25 mm x 0.25 µm)). El biol fue disuelto en DMSO para ser inyectado en la columna, la temperatura de la columna se programó inicialmente a 50 °C durante cinco minutos, luego se aumentó 20°C cada minuto hasta alcanzar una temperatura de 200 °C, la cual se mantuvo durante cinco minutos, después de llegar a los 200 °C, se incrementó 20 °C cada minuto hasta llegar a 250 °C, donde se mantuvo durante 10 minutos

El tiempo total de ejecución fue de 30 min, de acuerdo con el método reportado por Adams (2007). Los compuestos se identificaron con base a la comparación de sus índices de retención (IR), en relación con los n-alcanos estándar (C6-C32) y su tiempo de retención. La identificación de los compuestos fue comparada con la base de datos contenidos en la biblioteca NIST02 y consultados en la literatura. Se calcularon los porcentajes relativos del cromatograma de iones totales (TIC).

Análisis de microorganismos patógenos

Se llevó a cabo un análisis para determinar la presencia del indicador biológico de contaminación (coliformes fecales) y patógenos (*Salmonella spp*) de acuerdo con la NOM-004-SE-MARNAT-2002.

Evaluación del biol en la producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

Para este experimento se emplearon plantas de tomate saladette var. “El Cid”, las cuales se trasplantaron a bolsas de polietileno negro de 5 L de capacidad, empleando como sustrato una mezcla (70:30) de tezontle y fibra de coco. Las plantas se mantuvieron en sistema de riego hidropónico con goteros durante 65 días después de trasplante (DDT). La nutrición del cultivo durante los primeros 20 DDT se realizó con una solución Steiner al 50 %. A partir del día 21 DDT y hasta el final del cultivo (65 DDT) se aplicó al 100 % la misma solución (Steiner, 1966). El cultivo fue establecido en condiciones de invernadero en el Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, de la Universidad de Guadalajara, ubicado en Las Agujas, Zapopan, Jalisco.

Durante el desarrollo del cultivo, con frecuencia semanal se realizaron labores de poda de las plantas, y el tutorio del cultivo. Además, se hicieron distintas aplicaciones preventivas para evitar la presencia de plagas y enfermedades, mediante la aplicación de previcur (Propamocarb, Fosetil) ®,

imisharda (Imidacloprid) ®, corona killer (cloruro) ®, talstar xtra (abamectina, bifentrina) ® a las dosis recomendadas por el fabricante.

El diseño experimental fue completamente al azar, con 6 tratamientos, 4 repeticiones y 5 plantas como unidades experimentales, en la Tabla 1 se muestran los tratamientos.

La primera aplicación de los tratamientos se realizó a los 24 DDT y se realizaron dos aplicaciones más de forma quincenal (n = 4). Para los tratamientos T1, T2, T3, y T4 se efectuaron aplicaciones del biol vía foliar y en drench. Para el control positivo (T5) se hicieron aplicaciones foliares del producto comercial Vigofort ® (auxinas 3050 ppm, giberelinas 8091 ppm y citocininas 3100 ppm). Se consideró como control negativo al tratamiento testigo (T6), al cual no se le aplico ningún tipo de producto, cada tratamiento se realizó con una n = 4.

A los 65 DDT se realizó la evaluación de las plantas tomando en cuenta las siguientes variables: altura de la planta (cm), diámetro del tallo (mm), número de hojas y se determinó las unidades SPAD® mediante un medidor de clorofila spad-502 plus, tomando la lectura directamente en hojas de la parte baja, media y alta de la planta. Además, se determinó el pH del sustrato mediante un potenciómetro sólido (Hanna instruments®).

Análisis Estadístico

Los datos fueron sometidos a un ANOVA de una vía (p ≤ 0.05) y Tukey (p ≤ 0.05) como prueba post-hoc, usando el programa Minitab ®.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido mineral del biol

Los resultados obtenidos (Tabla 2) muestran que los contenidos minerales son diferentes dependiendo del tipo de producto analizado (digestato), lo cual puede deberse a la diferencia del material o sustrato de origen empleado en la

Tabla 1. Tratamientos utilizados para la evaluación del biol en cultivo de tomate.

Table 1. Treatments used for the evaluation of biol in tomato crops.

Tratamientos		Aplicación	Dosis
1	Biol	Foliar	5 %
2			10 %
3		Sustrato	5 %
4		“drench”	10 %
5	Control (+) Vigofort ®	Foliar	1 ml/L
6	Control (-) Testigo	(-)	(-)

Tabla 2. Contenido y comparación de elementos esenciales del biosol y biol.
Table 2. Content and comparison of essential elements of biosol and biol.

Muestra	pH	Macronutrientes				Micronutrientes			
		K	Ca	Mg	Na	Cu	Mn	Fe	Zn
		ppm							
Valores óptimos en tomate (Sainju <i>et al.</i> , 2003)	6.7 - 7.5	60000	12500	5000	-	15	30	90	80
Biosol (tomate + estiércol bovino)	6.8	641	739	105	184	15.9	9.5	176.5	8.8
Biol (tomate + estiércol bovino)	7.2	5492	2478	485	887	13.9	1.7	13	2.5
Biol bovino (Condori-Vargas <i>et al.</i> , 2018)	8.85	1610	170	90	250	0.61	1.19	5.62	1.42
Biol bovino (Cano <i>et al.</i> , 2016)	6.9	600	100	100	550	0.1	0.5	3.9	0.5

(-) No determinado.

digestión (Vitti *et al.*, 2021). Mokgolo *et al.* (2024) reportaron que el estiércol de bovino tiene la siguiente composición mineral; 28.3 y 2.10 % de carbono y nitrógeno, respectivamente, además de P (4.27 g Kg⁻¹), K (14.6 g Kg⁻¹), Na (2.53 g Kg⁻¹), Ca (18.8 g Kg⁻¹), Mg (13.3 g Kg⁻¹), estos nutrientes son aportados a los productos finales (biol y biosol) de la digestión anaerobia.

Por otro lado, no se cuenta con datos comparativos para un biosol en cuanto al contenido mineral, por lo que los resultados encontrados en esta investigación pueden ayudar para futuros trabajos. De manera general, los resultados obtenidos de macros y micronutrientes en el biol son similares a los reportados por otros autores en biol de estiércol bovino (Cano *et al.*, 2016; Condori-Vargas *et al.*, 2018; Sanchez *et al.*, 2023). Esto se deben a su acumulación en la biomasa derivada de la aplicación de fertilizantes para cubrir la demanda del cultivo de tomate durante su etapa productiva.

Para el caso de los macronutrientes (K, Ca, Mg, Na), las concentraciones en el biol (5492, 2478, 485 y 887 ppm) son mucho mayores que en el biosol (641, 739, 105 y 184 ppm) sobre todo en la cantidad de potasio, calcio y magnesio. Los contenidos reportados por Cano *et al.* (2016) en biol, a excepción del calcio, son similares a los contenidos de biosol de este trabajo.

Con respecto al contenido encontrado de micronutrientes (Cu, Mn, Fe, Zn), el biosol presentó mayores valores que el biol, contrario a lo encontrado en los macronutrientes (Tabla 2). En este sentido, las concentraciones de micronutrientes en el biol son similares a las reportadas en los bioles de Condori-Vargas *et al.* (2018).

López-Dávila *et al.* (2017) obtuvieron en un biol un pH de 7.5, y concluyeron que los valores alcalinos pueden no ser favorables para algunos cultivos, concordando con el pH de 7.2 obtenido para el biol de esta investigación. Sainju *et al.* (2003), consideran el pH óptimo para el cultivo de tomate en suelo de 6.7-7.5, concordando que el biol está dentro del rango de tolerancia para este cultivo, ya que el pH afecta la solubilidad y disponibilidad de los nutrientes.

Considerando lo propuesto por Sainju *et al.* (2003) como los niveles óptimos de nutrientes requeridos para la nutrición del cultivo de tomate, los niveles de todos los nutrientes cuantificados en el biol y biosol se encuentra por debajo de estos valores (Tabla 2). A pesar de ello, al contener el biol todos estos elementos útiles en el desarrollo del cultivo de tomate, se puede usar para disminuir el uso de fertilizantes químicos, y/o para complementar la fertilización del cultivo. En este caso si se desea usar el biol como fertilizante es necesario hacer análisis de suelo, y conocer las necesidades de la planta para aplicar solo lo necesario en cada etapa del cultivo.

El mayor contenido de macronutrientes fue encontrado en el biol comparado al biosol y, por el contrario, un mayor contenido de micronutrientes en el biosol respecto al biol. Se debe a que durante proceso de digestión anaeróbica hay presencia de enzimas hidrolíticas que facilitan la solubilización de la matriz sólida, donde se encuentran los macronutrientes que provienen de este proceso digestivo, los micronutrientes difícilmente pasaron por este proceso digestivo.

Contenido de giberelinas y auxinas en el biol

Se determinó la concentración de giberelinas en el biol obteniéndose una concentración de 432.03 µg/mL y en una disolución al 5 y 10 % que sería utilizada posteriormente en la aplicación del biol a un cultivo de tomate, se obtuvieron 115.07 y 252.13 µg/mL respectivamente. En el caso de las auxinas, no se detectó la presencia de este regulador de crecimiento en ninguna de las concentraciones empleadas. De acuerdo con lo descrito por Marconi y Rosa (2024) los bioles tienen en su composición adeninas, purinas, giberelinas y auxinas sin importar su origen, debido a que estos elementos son productos del desecho del metabolismo de las bacterias que se encuentran en la fermentación anaerobia; sin embargo, en el biol obtenido a partir de material vegetal de desecho del cultivo de tomate y estiércol bovino sólo pudimos identificar la presencia de giberelinas; las cuales además de la elongación celular en las plantas, tienen la capacidad de

inducir la floración y favorecer el cuajado y crecimiento de algunos frutos, pues incrementan la hidrólisis de almidón, fructosa y sacarosa, con lo que se origina moléculas de fructosa y glucosa, que contribuyen a la formación de la pared celular (Serna *et al.*, 2017).

Tamizaje fitoquímico en el biol

De acuerdo con las determinaciones cualitativas para identificar la presencia o ausencia de carbohidratos, flavonoides, taninos, naftoquinonas, antoquininas, alcaloides y saponinas, se observó la presencia de alcaloides a través de la prueba de Wagner, así como saponinas en el biol, obteniéndose un resultado negativo para los otros elementos determinados.

Muchos alcaloides son importantes toxinas para animales y otros organismos, debido a que poseen una estructura similar con moléculas que participan en la transmisión de señales, y su capacidad de intercalarse con el DNA, sirviendo como químicos de defensa de las plantas contra depredadores e incluso contra algunas bacterias, hongos y virus (Wink y Schimer, 2018). López-Dávila *et al.* (2017) encontraron propiedades antifúngicas para el control de *Rhizoctonia solani* en un biol proveniente de estiércol de porcino. Por otra parte, Lu *et al.* (2018) observaron propiedades antifúngicas en un biol de estiércol de gallina, contra *Fusarium oxysporum*, concluyendo que se debía a la concentración de metabolitos y otros compuestos producidos durante el proceso de digestión.

Es probable que el biol proveniente de la digestión de los restos de tomate y estiércol de bovino, tenga este tipo de propiedades contra algunos hongos patógenos, por su contenido de alcaloides, y se pueda usar como biofungicida en los cultivos, como los resultados publicados por Vitti *et al.* (2021), quienes obtuvieron una reducción en la incidencia de *Fusarium solani* en plantas de tomate con el uso de digestato de estiércol de bovino. Por otro lado, Lu *et al.* (2019) identificaron diferentes compuestos como, hormonas (L-adrenalina, 19-hidroxi androstenediona y estrona), alcaloides (triptamina y N-metiltiramina), y vitamina B5, en diferentes tipos de estiércol y sus digestatos.

Las saponinas se encuentran como glicósidos esteroideos, glicósidos esteroideos alcaloides o bien glicósidos triterpenos. Son por tanto triterpenoides o esteroides (Góngora-Chi *et al.*, 2023). Ya que no se encontraron carbohidratos, las saponinas que contiene el biol son de tipo agliconas (terpeno sin el azúcar) en este caso denominadas sapogeninas (Góngora-Chi *et al.*, 2023). En el caso del biol son triterpenos hidrolizados de tipo saponinas, aunque el rol biológico de las saponinas no es comprendido completamente, generalmente son consideradas como parte del sistema de defensa de las plantas contra patógenos y herbívoros, especialmente debido a su sabor amargo (Sugiyama, 2021).

Guano (2015) cuantificó en hojas de tomate la concentración de flavonoides (2,93 mg/g de materia seca) y fenoles (3,44 mg/g de materia seca), así como la presencia en incidencia moderada de alcaloides y taninos, triterpenos y/o esteroides de a través de un método colorimétrico, por otro lado, con el mismo método, Ferrer-Dubois *et al.* (2018), de-

terminaron una marcada presencia de carotenoides, fenoles, taninos, carbohidratos y flavonoides en el fruto de tomate. A pesar de que la planta de tomate contiene la mayoría de los grupos de metabolitos secundarios, en el biol solo se pudo demostrar la presencia de alcaloides y saponinas, por lo que, al combinarse con el estiércol bovino en la digestión anaerobia, estas propiedades cambiaron, debido probablemente a los cambios de temperatura, y la descomposición por los microorganismos.

Compuestos determinados por CG/MS

En total se encontraron 9 compuestos en la fracción de biol sometida a estudio siendo el alcohol feniletílico (6.74 %) el de mayor proporción, seguido de D-limoneno (4.91 %) y α -selineno (4.1 %). Se determinaron también otros compuestos en menor proporción, los cuales se describen a continuación; Silicato de Metilo (3.7 %), 2-cyclohexen-1-one (3.05 %), α -linalool (2.8 %), p-menth-1-en-8-ol (2.35 %), ácido láurico (2.15 %) y bencenacetaldéhidó (1.5 %) (Tabla 3).

Lu *et al.* (2019) reportaron la presencia de ácido láurico (ácido dodecanoico) en un digestato proveniente de estiércol de pato. Wang *et al.* (2022) probaron que el ácido láurico afecta el contenido de ergosterol en la membrana celular de *Rhizoctonia solani* induciendo apoptosis, por lo que concluyeron, este tipo de ácido graso puede ser usado como un método de control para *R. solani*, concordando con lo mencionado por Matsue *et al.*, (2019) que mencionan que actúa interrumpiendo la membrana celular para proteger las células del huésped de la infección, provocando que se convierta en un compuesto de interés farmacéutico.

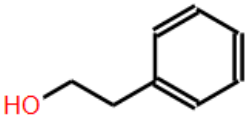
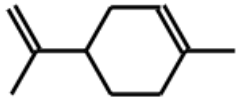
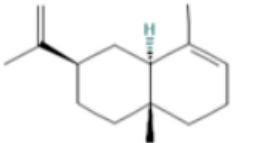
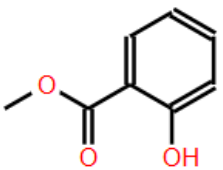
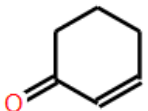
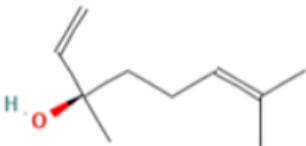
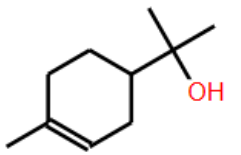
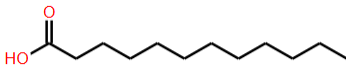
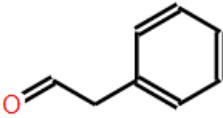
Por otro lado, el metil silicilato es producido por un gran número de plantas, como es el caso de la planta de tabaco, se sintetiza del ácido salicílico, ambos compuestos están involucrados en el desarrollo de la resistencia sistémica de las plantas, protección contra patógenos y resistencia en condiciones de estrés (Chen *et al.*, 2019; Gondor *et al.*, 2022); mientras que al α -linalool, se le atribuyen propiedades antimicrobianas, antifúngicas ansiolíticas y antiinflamatorias, por lo que en USA está registrado como un insecticida (Bueno-Duarte y Mendez-Sánchez, 2015). El D-limoneno es un monoterpeno monocíclico, usado comúnmente en la industria de los alimentos, cosméticos y solventes (Sun, 2007; Kim *et al.*, 2013). Se ha evaluado también su uso como insecticida por su bajo riesgo de toxicidad (Karr y Coats, 1988).

Finalmente, el bencenacetaldéhidó, y alcohol (2 feniletílico alcohol) son compuestos que les confieren propiedades a los alimentos como su aroma (Wang *et al.*, 2019; Lan *et al.*, 2020; Tamura *et al.*, 2022). Kang *et al.* (2019), identificaron este compuesto en diferentes muestras de té negro y le confirieron olores característicos, como rosa y floral, parecido al alcohol feniletílico, que es un alcohol primario del grupo de fragancias (Chauhan y Mohan, 2021; Karaalioglu y Yüceer, 2021).

Presencia de microorganismos patógenos en el biol

En la muestra de biol se encontraron coliformes fecales, pero se cumple con los parámetros del Límite Máximo Permissible

Tabla 3. Compuestos químicos detectados en muestra líquida de biol por cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas**Table 3.** Chemical compounds detected in biol liquid sample by gas chromatography coupled to mass spectrometry.

Nombre del compuesto	Estructura química	Tiempo de Retención (min)	Abundancia Relativa (%)
Alcohol feniletílico		9.342	6.74
D-limoneno		9.945	4.91
α -selineno		12.544	4.1
Salicato de metilo		11.242	3.7
2-ciclohexan-1-uno		8.468	3.05
α -linalool		8.842	2.8
p-menth-1-en-8-ol		10.65	2.35
Ácido láurico		11.665	2.15
Bencenacetaldehído		8.545	1.5

Nota: Tiempos de retención en columna DB-5 utilizando series de n-alcenos; el índice de tiempo de retención y los espectros de iones moleculares, fueron comparados con la biblioteca de datos NIST2001; promedio de tres repeticiones. Coeficiente de variación < 9,2 %.

(LMP) por la NOM-004 que es Menor de 2×10^6 , dando como resultado 8×10^4 de Coliformes fecales en NMP/g en base seca. Sin embargo, el contenido de *Salmonella spp.*, obteniendo 420 NMP/g en base seca, resultado mayor a los límites establecido por la NOM-004 (300 NMP/g de base seca); por lo que, en lo sucesivo, se recomienda realizar un proceso esterilización del biol antes de aplicarlo a un cultivo, así como análisis de patógenos al estiércol o bien evitar su uso.

Evaluación del biol en tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

Los resultados obtenidos al aplicar el biol en las plantas de tomate, demuestran que hubo diferencias significativas en los parámetros morfológicos evaluados (altura de la planta, diámetro de tallo y No. de hojas) observándose que las plantas que presentaron mayor altura fueron las de los tratamientos de aplicación foliar (T1 y T2), las cuales a los 65 DDT presentaron una altura de 77.66 cm y 80.25 cm respectivamente, mientras que en el tratamiento de biol aplicado a sustrato al 5 % (T3), mostró las plantas con menor altura, con un promedio final de 58.1 cm (Tabla 4).

Castro-Camba *et al.* (2022), mencionan que cuando las plantas son sometidas a aplicaciones de giberelinas pueden lograr un mayor crecimiento; por su parte, Serna *et al.* (2017) encontraron que a partir de la segunda aplicación con 150 µg/mL de ácido giberélico se pueden obtener plantas de mayor altura. También se ha demostrado que las giberelinas favorecen el crecimiento y desarrollo en plántulas de tomate, mostrando mayor altura, diámetro de tallo, número de hojas, así como un mayor peso fresco de raíz y plántula (Ortega-Martínez *et al.*, 2013).

Las plantas con mayor altura fueron aquellas a las que se les aplicó biol foliar al 5 y 10 %, cuyo contenido de giberelinas fue de 115.069 y 259.127 µg/mL respectivamente. La inducción del crecimiento en altura de las plantas es uno de los efectos fisiológicos más notables de las giberelinas, ya que alarga los entrenudos y estimula la elongación celular en respuesta a las condiciones de luz y oscuridad (Alcantara-Cortes *et al.*, 2019).

Respecto al diámetro de tallo, se encontró que las plantas con los tallos más gruesos fueron las de los tratamientos

1, 2 y 6 con un valor promedio de 6.42, 6.75 y 7.3 mm, respectivamente. Por otro lado, los tratamientos 4 y 3 no hubo engrosamiento del tallo (Tabla 4).

En cuanto al desarrollo de las hojas, mostraron mayor follaje los tratamientos 1, 2 y 5, de la misma manera que el testigo (T6), por lo que no se afectó en el desarrollo del tejido foliar (Tabla 4).

El abono con biol porcino (5 %) provoca un aumento en el número de hojas en plantas de tomate, observándose este efecto a partir de los 61 DDT, concluyendo que este aumento se debe al contenido de nutrientes en el biol (López-Dávila *et al.*, 2017). En este trabajo no hubo una diferencia significativa entre los tratamientos y el testigo. Sin embargo, el trabajo concluyó a los 65 DDT, por lo que pueden mostrarse diferencias con más aplicaciones de biol.

Los resultados de las unidades SPAD medidos en las plantas, no mostraron diferencia significativa entre tratamientos (Tabla 4). Sin embargo, T2 y T5 presentaron los mayores valores (38.32 y 39.38 unidades SPAD), por lo que, la aplicación del biol no afectó la actividad fotosintética en las plantas. La aplicación en el sustrato del biol mediante “drench” no modificó de manera significativa el pH del mismo.

CONCLUSIONES

La digestión anaerobia demostró ser una alternativa viable para transformar y aprovechar los residuos de cosecha de los cultivos ya que permite obtener dos productos valiosos, el digestato líquido (biol) y un digestato sólido (biosol); ambos con potencial de aprovechamiento agrícola aportando a la economía circular de los cultivos. El biol resultó con alto contenido de giberelinas, lo que favoreció el crecimiento de las plantas de tomate al aplicarse de manera foliar en dosis de 5 y 10 %. Además, el biol resultó ser una opción viable como abono en la agricultura, y como suplemento en la nutrición de los cultivos por el aporte de minerales. En el biol se encontraron compuestos que se han documentado eficaces para la protección de plantas contra plagas y enfermedades, como el ácido láurico, salicilato de metilo y α-linalool. Se recomienda continuar con la investigación del biol derivado de otros residuos agrícolas.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores(as) no tienen conflictos de interés que declarar.

REFERENCIAS

Alcantara-Cortes, J.S., Acero Godoy, J., Alcántara Cortés, J.D. y Sánchez Mora, R.M. 2019. Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. NOVA. 7: 109-129.

Almeida, P.V., Gando-Ferreira, L.M. y Quina, M.J. 2024. Tomato residue management from a biorefinery perspective and towards a circular economy. Foods. 13: 1873.

Bueno-Duarte, Y. y Mendez-Sánchez, S.C. 2015. Efecto del Linalool sobre la bioenergética de mitocondrias de hígado de rata. Revista de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias. 22: 33-41.

Tabla 4. Medias de altura, diámetro del tallo, número de hojas y unidades SPAD de tomate.

Table 4. Means of height, stem diameter, number of leaves and SPAD units of tomato.

Tratamiento		%	Altura (cm)	Grosor del tallo (mm)	Número de hojas	Unidades SPAD
T1	Biol	5	77.66 a	6.42 ab	12.41 a	36.02 a
T2		10	80.25 a	6.75 ab	10.75 ab	38.32 a
T3		5	58.16 c	5.25 c	7.50 c	37.69 a
T4		10	69.00 ab	6.21 bc	10.0 b	35.98 a
T5	Control (+)		64.66 b	6.37 ab	11.1 ab	39.38 a
T6	Control (-)		72.08 b	7.30 a	12.6 a	36.10 a

Valores con la misma letra de manera vertical en cada columna no presentaron diferencia significativa de acuerdo con la prueba.

- Cabos, J., Bardales, C.B., León, C.A. y Gil, L.A. 2019. Evaluación de las concentraciones de Nitrógeno, Fósforo y Potasio del biol y biosol obtenidos a partir de estiércol de ganado vacuno en un biodigestor de geomembrana de policloruro de vinilo. *Arnaldoa*. 26: 1165-1176.
- Cano, M., Bennet, A., Robles, S., Sainos, U. y Castorena, H. 2016. Caracterización de bioles de la fermentación anaeróbica de excretas bovinas y porcinas. *Agrociencia*. 50(4): 471-479.
- Castro-Camba, R., Sánchez, C., Vidal, N. y Vielba, J. M. 2022. Plant development and crop yield: The role of gibberellins. *Plants*. 11: 2650.
- Castro-Rivera, R., Solís-Oba, M.M., Chicatto-Gasperín, V. y Solís-Oba, A. 2020. Producción de biogás mediante codigestión de estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 36: 529-539.
- Celis, L.X. y Gallardo, I.R. 2008. Estandarización de métodos de detección para promotores de crecimiento vegetal (ácido indol acético y giberelinas) en cultivos microbianos. Tesis de Grado. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Chauhan, N.M. y Mohan, K.S. 2021. Dual identities for various alcohols in two different yeasts. *Mycology*. 12: 25-38.
- Chen, L., Wang, W.S., Wang, T., Meng, X. F., Chen, T., Huang, X, Li, Y. y Hou, B. 2019. Methyl salicylate glucosylation regulates plant defense signaling and systemic acquired resistance. *Plant Physiology*. 180: 2167-2181.
- Condori-Vargas, S., Ruiz-Huanca, P., Ticona-Guanto, O. y Chipana-Mendoza, G.J. 2018. Evaluation of the vegetative development of maralfalfa (*Pennisetum* sp.) under the application of bovine biol in the Choquenaira Experimental Station. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*. 5: 50-67.
- Corlay, L., Robledo, A., Hernández, J., Pineda, R., Maldonado, J., Cruz, A. y Álvarez, E. 2009. Caracterización química y microbiológica del effluente de digestor anaeróbico. Universidad Autónoma de Chapingo.
- Domínguez, R., León, M., Samaniego, J. y Sunkel, O. (2019). Recursos naturales, medio ambiente y sostenibilidad. 70 años de pensamiento de la CEPAL. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago.
- Faith, M. 2010. Evaluación de la calidad química y microbiológica del effluente de dos biodigestores a escala en el ITCR para su utilización como bioabono en ensayos de invernadero. Tesis de Grado. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.
- Ferrer-Dubois, A.E., Fung-Boix, Y., Isaac-Alemán, E., Beenaerts, N. y Cuypers, A. 2018. Phytochemical determination of *Solanum lycopersicum* L. fruits irrigated with water treated with static magnetic field. *Revista Cubana de Química*. 30: 232-242.
- Flotats, X. 2018. Implantación de la digestión anaerobia en el sector agropecuario. En: *Depuración de aguas residuales: digestión anaerobia*. S.C. Vicent (et al.) (ed.), p 44-66. Biblioteca de la Universitat Jaume I. Castelló de la Plana.
- Gondor, O., Pál, M., Janda, T. y Szalai, G. 2022. The role of methyl salicylate in plant growth under stress conditions. *Journal of Plant Physiology*. 277: 153809.
- Góngora-Chi, G.J., Lizardi-Mendoza, J., López-Franco, Y.L., López-Mata, M.A. y Quihui-Cota, L. 2023. Métodos de extracción, funcionalidad y bioactividad de saponinas de *Yucca*: una revisión. *Biotecnia*. 25: 147-155.
- Guano, G.E. 2015. Evaluación de la actividad cicatrizante del extracto de las hojas de tomate (*Solanum lycopersicum* L) en lesión, inducida en ratones (*Mus musculus*). Tesis de Grado. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- HACH. 2000. Manual de análisis de agua 2ª ed. Loveland: Hach Company.
- Kang, S., Yan, H., Zhu, Y., Liu, X., Lv, H.P., Zhang, Y. y Lin, Z. 2019. Identification and quantification of key odorants in the world's four most famous black teas. *Food Research International*. 121: 73-83.
- Karaalioglu, O. y Yüceer, Y.K. 2021. Nonconventional yeasts to produce aroma compounds by using agri-food waste materials. *FEMS Yeast Research*. 21: foab063.
- Karr, L.I. y Coats, J. 1988. Insecticidal properties of d-Limonene. *Journal of Pesticide Science*. 13: 287-290.
- Kim, Y.W., Kim, M.J., Chung, B.Y., Bang, d.Y., Lim, S.K., Choi, S.M., Lim, D.S., Cho, M.C., Yoon, K., Kim, H.S., Kim, K.B., Kim, Y.S., Kwack, S.J. y Lee, B.M. 2013. Safety evaluation and risk assessment of d-Limonene. *Journal of Toxicology and Environmental Health B*. 16: 17-38.
- Lan, Y.B., Xiang, X.F., Yang, W.X., Zhu, B.Q., Pu, H.T., y Duan, C.Q. 2020. Characterization of free and glycosidically bound volatile compounds, fatty acids, and amino acids in *Vitis davidii* Foex grape species native to China. *Food Science and Biotechnology*. 29: 1641-1653.
- Lim, J.W., Park, T., Tong, Y.W., y Yu, Z. 2020. The microbiome driving anaerobic digestion and microbial analysis. *Advances in bioenergy*. 5:1-61
- López, E. 2017. Desarrollo de un material biodegradable mediante el uso de residuos agrícolas de la producción del jitomate bajo invernadero. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México
- López-Dávila, E., Calero-Hurtado, A., Gómez-León, Y., Gil-Unday, Z., Henderson, D. y Jimenez, J. 2017. Efecto agronómico del biosólido en cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*): control biológico de *Rhizoctonia solani*. *Cultivos Tropicales*. 38: 13-23.
- Lu, J., Muhmood, A., Czekala, W., Mazurkiewicz, J., Dach, J. y Dong, R. 2019. Untargeted metabolite profiling for screening bioactive compounds in digestate of manure under anaerobic digestion. *Water*. 11: 1-12.
- Lu, J., Muhmood, A., Liu, H., Dong, R. y Pang, S. 2018. Exploring bioactive compounds in anaerobically digested slurry: extraction, characterization, and assessment of antifungal activity. *Waste and Biomass Valorization*. 11.
- Mahajan, R. 2023. Environment and health impact of solid waste management in developing countries: A review. *Current World Environment*. 18:18-29.
- Marconi, P. y Rosa, L. 2024. Global potential nitrogen recovery from anaerobic digestion of agricultural residues. *Environmental Research Letters*. 19: 054050.
- Herrero, J.M. 2008. Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. GTZ-Energía. Bolivia.
- Martínez, C.M., Böttinger, S., Oechsner, H., Kanswohl, N. y Schlegel, M. 2008. Instalaciones de biogas a mediana y gran escala en Alemania. [Consultado 5 Agosto 2020] 2008. Disponible en https://www.engormix.com/porcicultura/biodigestores-cerdos-energias-renovables/instalaciones-biogas-mediana-gran_a27426/.

- Matsue, M., Mori, Y., Nagase, S., Sugiyama, Y., Hirano, R., Ogai, K. y Okamoto, S. 2019. Measuring the antimicrobial activity of lauric acid against various bacteria in human gut microbiota using a new method. *Cell Transplantation*. 28: 1528-1541.
- Mokgolo, M.J., Mzezewa, J. y Zerizghy, M.G. 2024. Investigating the synergistic effect of tillage system and manure application rates on selected properties of two soil types in Limpopo Province, South Africa, *Sustainability* (2071-1050), 16(20), p. 8941.
- Negrete-Cardoso, M., Rosano-Ortega, G., Álvarez-Aros, E.L., Tavera-Cortés, M.E., Vega-Lebrún, C.A. y Sánchez-Ruiz, F.J. 2022. Circular economy strategy and waste management: a bibliometric analysis in its contribution to sustainable development, toward a post-COVID-19 era. *Environmental Science and Pollution Research*. 29: 61729-61746.
- Norma Oficial Mexicana, NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. [Consultado 20 Septiembre 2020] 2003. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003.
- Ortega-Martínez, L.D., Mendoza, J.O., Valenzuela, C.M., Serrano, A.P. y Olarte, J.S. 2013. Efecto de las giberelinas sobre el crecimiento y calidad de plántulas de tomate. *Biotecnia*. 15: 56-60.
- Palermi, F., Magaril, E., Conti, F., Kiselev, A. y Rada, E.C. 2021. Circular economy concepts applied to waste anaerobic digestion plants. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 254: 57-68.
- Pujol, A., Tamargo, B., Salas, E., Calzadilla, C., Acevedo, R. y Sierra, G. 2020. Tamizaje fitoquímico de extractos obtenidos de la planta *Sapindus saponaria* L que crece en Cuba. *Bionatura*. 5: 1209-1214.
- Richard, E.N., Hilonga, A., Machunda, R.L. y Njau, K.N. 2019. A review on strategies to optimize metabolic stages of anaerobic digestion of municipal solid wastes towards enhanced resources recovery. *Sustainable Environment Research*. 29: 1-13.
- Sainju, U. 2003. Mineral nutrition of tomato. *Food, Agriculture & Environment*. 1: 176-183.
- Sanchez, J.D., Escobedo, M.K., Vásquez, C.B., Vásquez, K.M. y Torres, C.A. 2023. Producción de biogás y bioabonos a partir de desechos lignocelulósicos en un biorreactor anaeróbico. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*. 7: 583-597.
- Serna, A., Hurtado, A. y Ceballos Aguirre, N. 2017. Efecto del ácido giberélico en el crecimiento, rendimiento y calidad del tomate bajo condiciones controladas. *Temas Agrarios* 22: 71-79.
- Skoog, D., Holler, F. y Crouch, S. 2018. Principios de Análisis Instrumental. 7ª ed. Cengage Learning. Ciudad de México.
- Steiner, A. 1996. The influence of chemical composition of nutrient solution on the production of tomato plants. *Plant and Soil*. 24: 454-466.
- Sugiyama, A. 2021. Flavonoids and saponins in plant rhizospheres: roles, dynamics, and the potential for agriculture. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*. 85: 1919-1931.
- Sun, J. 2007. D-Limonene: safety and clinical applications. *Alternative medicine review*. 12:259-264.
- Tamura, Y., Iwato, S., Miyaura, K., Asikin, Y. y Kusano, M. 2022. Metabolomic profiling reveals the relationship between taste-related metabolites and roasted aroma in aged pork. *LWT*. 155: 112928.
- Vega, D., Freire, M., Torres, T., Llumiquinga, K. y Jácome, C. 2022. Biodigestión: proceso autosostenible para la obtención de energía renovable. *Journal of Agro-Industry Sciences*. 4: 29-36.
- Vitti, A., Elshafie, H.S., Logozzo, G., Marzario, S., Scopa, A., Camele, I. y Nuzzaci, M. 2021. Physico-chemical characterization and biological activities of a digestate and a more stabilized digestate-derived compost from agro-waste. *Plants*. 10: 386.
- Wang, J., Yang, C., Hu X., Yao, X., Han, L., Wu, X., Li, R., Wen, T. y Ming, L. 2022. Lauric acid induces apoptosis of rice sheath blight disease caused by *Rhizoctonia solani* by affecting fungal fatty acid metabolism and destroying the dynamic equilibrium of reactive oxygen species. *Journal of Fungi*. 8: 153.
- Wang, Z., Xiao, Q., Zhuang, J., Feng, T., Ho, C.T. y Song, S. 2019. Characterization of aroma active compounds in four yeast extracts using instrumental and sensory techniques. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 68: 267-278.
- Westerholm, M. y Schnürer, A. 2019. Microbial responses to different operating practices for biogas production systems. En: *Anaerobic Digestion*. J. Rajesh. IntechOpen.
- Wink, M. y Schimmer, O. 2018. Molecular modes of action of defensive secondary metabolites. *Annual Plant Reviews Online*. 39:21-161 doi:10.1002/9781119312994.apr0418