

CONTROL DE EMISIONES DE OLORES OFENSIVOS EN EL SECTOR PECUARIO: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

Control of offensive odors emissions in livestock farms: a systematic review

Ana María Rivera Bautista, José Luis Cárdenas Talero

Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Grupo de investigación en Ingeniería Electrónica, Industrial y Ambiental-GIEIAM, Colombia. E-mail: jose.cardenas03@usc.edu.co

(Recibido 25 de Octubre de 2023 y aceptado 07 de Diciembre de 2023)

Resumen

Las emisiones de olores ofensivos de las unidades pecuarias pueden generar molestias y afectaciones en la salud de las personas que residen en el área de influencia de estas instalaciones. Con el propósito de reducir dicha problemática es necesario que en las granjas se implementen buenas prácticas y tecnologías que permitan reducir o eliminar los olores ofensivos. En el presente análisis bibliométrico para identificar las tendencias de investigación en el campo del control de olores ofensivos en unidades pecuarias. La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo en la base de datos Scopus y el análisis de co-ocurrencia se realizó con el software VOSviewer (versión 1.6.18). Como resultado de la estrategia de búsqueda se obtuvieron 518 documentos publicados entre los años 2012 y 2022. El análisis de palabras clave reveló que las principales actividades pecuarias investigadas son la porcícola, avícola y bovina. Adicionalmente, las tecnologías para el control, mitigación y/o reducción de los olores ofensivos en actividades pecuarias con mayor número de investigaciones corresponden a digestión anaerobia, biofiltración, biopercolación, adsorción con biocarbón y procesos de oxidación avanzada. Cabe resaltar que las investigaciones aplicadas en este sector productivo indican que estas tecnologías son efectivas para la reducción de las emisiones de olores y de sustancias odorantes como NH_3 y H_2S .

Palabras clave: *olores ofensivos, unidades pecuarias, biofiltración, biopercolación, digestión anaerobia.*

Abstract

Offensive odors emissions from livestock farms can cause nuisance and health effects to the persons who live in influence of the facilities. With the purpose to reduce this conflict is necessary that farms implement good practices and technologies which allow them to reduce or eliminate offensive odors. In the present work, a bibliometric analysis was done to identify the trends around offensive odors control in livestock farms. Scopus database was used to do the bibliometric search and VOSviewer (version 1.6.18) software was used to do a co-occurrence analysis. As a result of the search strategy, 518 documents published between the years 2012 and 2022 were found. The keyword analysis reveals that the main livestock activities are swine, poultry and cattle raising. Further, the most researched technologies to control, mitigate and reduce unpleasant odors are anaerobic digestion, biofiltration, biotrickling, biochar adsorption and advanced oxidation processes. It is worth noting that research applied in this productive sector indicates that these technologies are effective in reducing odor emissions and odorant substances such as NH_3 and H_2S .

Keywords: *offensive odors, livestock, biofiltration, biotrickling, anaerobic digestion.*

1. INTRODUCCIÓN

La actividad pecuaria es un sector importante de la economía agrícola de los países en desarrollo, puesto que permite la obtención de alimento y de materias primas tales como fibras, pieles, fertilizantes y combustibles [1]. De acuerdo con la Encuesta Nacional Agropecuaria en Colombia se cuenta con 50,1 millones de hectáreas destinadas para el sector agropecuario, de las cuales el 77,9% tiene un uso pecuario [2], siendo las principales actividades la cría de aves, de ganado bovino y de cerdos [3].

Las actividades pecuarias se caracterizan por impactar negativamente la calidad del aire, puesto que este sector emite el 14,5% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero [4]. Adicionalmente, emiten sustancias volátiles generadores de olores ofensivos como lo son compuestos de azufre, amoníaco, ácidos orgánicos, p-cresol y escatol [5–7]. De estas sustancias el amoníaco es el compuesto odorante más común producido en las explotaciones pecuarias [7].

Los olores ofensivos son catalogados como contaminantes atmosféricos [8–11]. Además de impactar negativamente al ambiente, la exposición a sustancias odorantes causa incomodidad y afectaciones a la salud tales como dolores de cabeza, náuseas, irritación de ojos, garganta y nariz [12]. También la exposición a largo plazo a algunas sustancias odorantes puede representar un riesgo para desarrollar patologías como asma, dermatitis atópica y daño neurológico [13].

La molestia por olores ofensivos ocurre cuando un individuo se expone de manera intermitente y a largo plazo a un olor desagradable [14]. En consecuencia, cuando las unidades pecuarias se localizan cerca de áreas residenciales se crean conflictos con los vecinos de estas instalaciones [15]. Factores como el aumento de unidades pecuarias confinadas a gran escala y la expansión de áreas residenciales cerca de zonas con usos agropecuarios, podría incrementar el número de conflictos y de quejas presentadas [16, 17].

Si bien la emisión de olores no puede ser completamente eliminada de las actividades productivas, si es posible implementar mecanismos que permitan minimizar estos contaminantes y así reducir su impacto y las molestias generadas a las poblaciones vecinas [18]. El control de olores ofensivos se puede realizar mediante la prevención, la minimización del impacto y la remoción de sustancias odorantes de las emisiones [19, 20, 21].

La prevención de la formación de olores ofensivos se logra mediante la implementación de diseños adecuados en las granjas y buenas prácticas operativas [21]. Para lograr la minimización del impacto se emplean mecanismos que permitan la dispersión de las sustancias odorantes tales como barreras vivas o zonas buffer; también se puede lograr mediante el enmascaramiento del olor desagradable, a través de la aplicación de olores aromáticos [16].

La remoción o reducción de la concentración de las sustancias odorantes antes de la descarga de la fuente, se realiza mediante la implementación de tecnologías al final del tubo, estas tecnologías pueden ser físicas, químicas o biológicas [7]. Dentro de las tecnologías físicas, se encuentran la adsorción, en la cual la sustancia odorante se transfiere a una fase líquida o sólida [22]. Dentro de las tecnologías químicas se encuentran el depurador húmedo, la combustión, el plasma no térmico y la oxidación fotocatalítica [7]. En los métodos biológicos se emplean microorganismos para degradar las sustancias odorantes; dentro de las tecnologías más desarrolladas se tienen los biofiltros convencionales, los biofiltros percoladores y los biodepuradores [23].

En el presente artículo se realizó un análisis bibliométrico para identificar las tendencias de investigación en el campo de la mitigación y control de emisiones de olores ofensivos generados en las prácticas pecuarias. Adicionalmente, se describen las tecnologías de control de olores ofensivos que han sido principalmente estudiadas en la última década en el sector pecuario.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis bibliométrico es una técnica que permite resumir grandes cantidades de datos bibliométricos para presentar el estado de la estructura intelectual y las tendencias emergentes de un tema o campo de investigación [24]. Se realizó un análisis bibliométrico para identificar las tendencias en el área de la mitigación y control de olores ofensivos en actividades pecuarias. La recolección de datos bibliográficos se realizó con la base de datos Scopus. La búsqueda se limitó a artículos de investigación, revisiones o reviews publicados entre los años 2012 y 2022, que contuvieran en su título, resumen o palabras clave las palabras relacionadas en la siguiente estrategia de búsqueda: TITLE-ABS-KEY (manure OR farm OR livestock) AND (odor) AND (control OR mitigation OR reducing OR removal OR treatment).

A partir de estos datos, se identificaron tendencias como el número de publicaciones realizadas por año, las principales áreas temáticas y los países con mayor número de publicaciones. Adicionalmente, se empleó el software VOSviewer© (versión 1.6.18) para realizar un análisis de co-ocurrencia de las palabras clave de los autores; como número mínimo de ocurrencia de una palabra clave se seleccionó 5.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis bibliométrico

Como resultado de la búsqueda bibliométrica se obtuvieron 518 documentos, de los cuales el 90,3% corresponden a artículos de investigación y el 9,7% a artículos de revisión bibliográfica. De acuerdo con la base de datos Scopus estos documentos están distribuidos en 25 áreas temáticas, las 5 principales áreas correspondieron a ciencias ambientales (25,1%), ciencias agrícolas y biológicas (21,9%), ingeniería (10,4%), bioquímica, genética y biología molecular (5,8%) e ingeniería química (4,9%).

La tendencia anual de publicaciones se presenta en la Figura 1. Se observa que el número de publicaciones se redujo de 2012 a 2013 y posteriormente presentó un

crecimiento progresivo pasando de 35 publicaciones en el 2013 a 57 en el año 2021, lo cual indica que existe interés por parte de la comunidad científica el estudio del control de olores ofensivos en el sector pecuario. Se resalta que la tendencia decreciente en el 2022 se debe a que el análisis bibliométrico refleja solo el primer semestre del año.

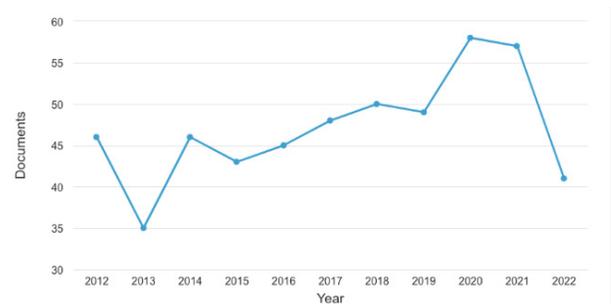


Figura 1. Artículos de investigación y reviews publicados en el periodo 2012-2022. **Fuente:** Elaboración con datos de www.scopus.com.

En cuanto a la distribución espacial de las publicaciones, en la Tabla 1 se observa que Estados Unidos es el país con mayor número de publicaciones con un total de 143 seguido de China con 98 y de Corea del Sur con 54. A nivel de Latinoamérica la producción científica es menor con un total de 30 publicaciones concentradas principalmente en Brasil.

Tabla 1. Producción científica por país.

Posición	País	N° de publicaciones
1	Estados Unidos	143
2	China	98
3	Corea del Sur	54
4	Polonia	31
5	Dinamarca	29
10	Brasil	13
18	Argentina	5
18	Chile	5
19	México	4
20	Colombia	3
22	Costa Rica	1
22	Ecuador	1

Fuente: Elaboración con datos de www.scopus.com.

3.2 Tecnologías para el control y mitigación de los olores ofensivos en el sector pecuario

3.2.1. Digestión anaerobia

El estiércol generado en las unidades pecuarias puede ser empleado como fertilizante puesto que este contiene nutrientes como nitrógeno, fósforo y materia orgánica que mejora las propiedades físicas del suelo [26]. Sin embargo, la aplicación de estiércol al suelo es una de las principales fuentes de olores ofensivos en la actividad pecuaria [27]. Frente a lo anterior, la digestión anaerobia se ha propuesto como alternativa para reducir el impacto por olor de esta práctica agropecuaria.

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el cual la materia orgánica se degrada en ausencia de oxígeno [28]. Como productos finales del proceso se obtiene biogás (60-70% de metano) el cual puede ser empleado como combustible y un digestato rico en nutrientes el cual puede ser transformado en un biofertilizante [29].

Diversos estudios han encontrado que la digestión anaerobia reduce el impacto por olor del estiércol o purín, dado que como resultado del proceso se obtiene un digestato con menor tasa de emisión de olor que la del ingestato [30, 31, 32, 33, 34]. La reducción en la concentración del olor se explica porque el proceso biológico permite la degradación de la materia orgánica y la obtención de un producto con alta estabilidad biológica [31, 32].

En cuanto a la aplicación del digestato al suelo, [30] reportaron que la emisión de olor del digestato desapareció completamente después de 30 horas de aplicación, mientras que el olor generado por la aplicación del purín sin tratamiento continuó por 60 horas. [35] encontraron que la emisión de olor del digestato 6 horas después de la aplicación superficial al suelo fue menor en un 76 y 86 % que la emisión de olor generada por la aplicación superficial del purín de cerdo. Por otra parte, [33] concluyeron que la aplicación de la fracción líquida del digestato de estiércol de ganado bovino con cultivos energéticos, permite reducir el impacto por olor en 82 y 88% con respecto a la aplicación de purín sin tratar.

3.2.2. Biofiltración

Los biofiltros son biorreactores de lecho fijo, en el cual los microorganismos inmovilizados permiten la oxidación de sustancias odorantes [36]. En la biofiltración la corriente gaseosa se conduce a través del lecho poroso y húmedo del reactor, donde los contaminantes se transfieren a la fase líquida y posteriormente son degradados por los microorganismos dentro de la biopelícula [37, 38]. La biopelícula contiene microorganismos como bacterias, hongos, levaduras, protozoos, amebas, nematodos y algas [23].

Dentro de las ventajas de los biofiltros se encuentra que presentan bajo costo de capital y de operación, no producen corrientes secundarias de residuos y permiten tratar grandes volúmenes de gas con bajas concentraciones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) y compuestos odorantes. Dentro de las limitantes de esta biotecnología se encuentra la obstrucción del lecho debido a las partículas de la corriente gaseosa, el deterioro del medio, la reducción de la eficiencia de remoción al operar a altas concentraciones de contaminantes y la dificultad en el control de la humedad y el pH [38].

En Tabla 2 se evidencia que la biofiltración es una tecnología efectiva para la remoción de olores, de amoníaco y de compuestos de azufre en el sector pecuario. Adicionalmente, [39] reportó que mediante la implementación de un biofiltro de tres etapas en un módulo de producción porcina se removió entre 80 a 99% de ácidos carboxílicos, aldehídos, cetonas, fenoles e indoles.

3.2.3. Biopercolación

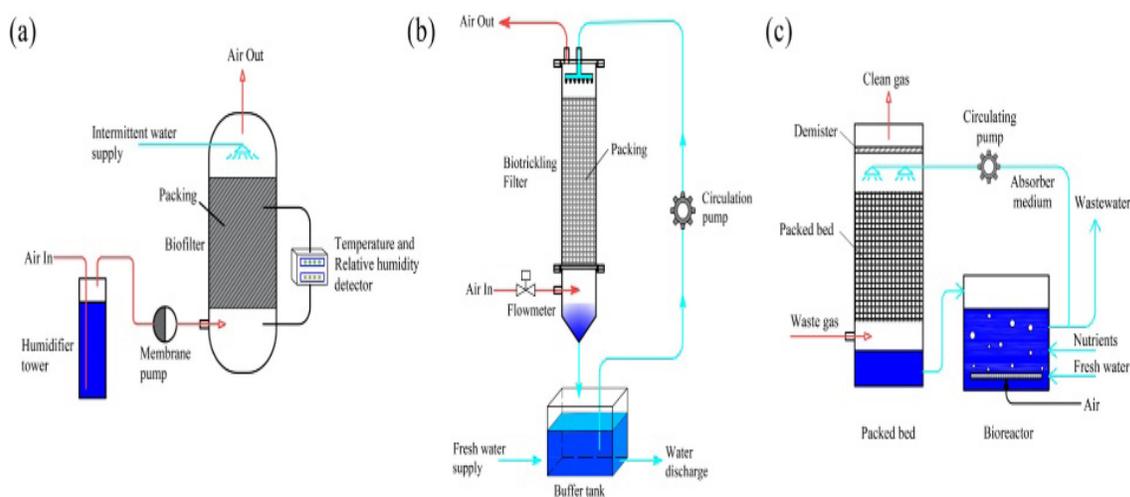
Los filtros biopercoladores son reactores de lecho fijo, en los cuales los microorganismos inmovilizados en el lecho oxidan las sustancias odorantes contenidas en corrientes gaseosas [44]. Como se observa en la Figura 3 la principal diferencia entre los biofiltros y los filtros biopercoladores es que en el último reactor una fase acuosa se irriga constantemente sobre el lecho; mientras que los biofiltros convencionales no tienen fase líquida móvil [44, 45].

Tabla 2. Desempeño de biofiltros en la remoción de olores amoníaco y compuestos que contienen azufre.

Unidad pecuaria	Material del lecho	Eficiencia de remoción de NH_3	Eficiencia de remoción de olor	Eficiencia de remoción de H_2S	Referencias
Secador de estiércol de gallina	Astillas de madera	74%	62%	-	[40]
Módulo de producción de cerdo	Astillas de madera	42%	52%	-	[40]
Módulo de producción de cerdo	Astillas de madera	38%	43%	-	[40]
Tanque de separación sólido-líquido en sistema de tratamiento de aguas residuales porcinas.	Carbón activado granular	-	86%	-	[41]
Módulo de producción de cerdo	Astillas de madera	64-92%	88- 95%	-	[42]
Módulo de producción de cerdo	Almohadillas de celulosa	-	-	64%	[43]
Módulo de producción de cerdo	Almohadillas de celulosa	-	-	75%	[39]

La fase líquida de los filtros biopercoladores suministra nutrientes y microelementos necesarios para el crecimiento de los microorganismos y al igual que asegura las condiciones de humedad para el mantenimiento de la biopelícula [45]. Además, en la fase líquida se encuentran microorganismos suspendidos que permiten la degradación de parte de las sustancias odorantes [23]. Los filtros biopercoladores se caracterizan por tratar una gama más amplia de contaminantes que los biofiltros convencionales; presentando altas eficiencias para la remoción de H_2S , amoníaco y COVs solubles en agua [38, 46]

Los filtros biopercoladores presentan como ventajas que sus costos de operación son bajos, la facilidad de control de procesos y tienen la capacidad de tratar los productos de degradación ácida de los COVs. Sin embargo, dentro de las desventajas de esta tecnología se encuentra que su construcción es compleja, como resultado del proceso se generan corrientes secundarias de residuos y en el lecho se presenta acumulación de excesos de biomasa lo cual puede causar taponamiento, aumento de la caída de presión, canalización del lecho y creación de zonas anaeróbicas [38].

**Figura 3.** Diagrama de a) biofiltros y b) filtros biopercoladores. **Fuente:** Adaptado de [7].

En cuanto a aplicaciones de filtros biopercoladores a escala real en unidades pecuarias, se encuentra el estudio realizado por [47] en la cual emplean dos filtros biopercoladores para tratar los olores generados en módulos de producción porcícola, como resultado obtuvieron eficiencias de remoción de amoníaco de 50.51% para el filtro biopercolador 1 y de 70.02% para el biofiltro percolador 2. [48] emplearon dos filtros biopercoladores para tratar el gas producido durante el compostaje aeróbico de estiércol animal, como resultado obtuvieron eficiencias de remoción de amoníaco, de COVs y de olor de 88.78%, 70.25% y 88.10%, respectivamente.

3.2.4. Adsorción con biocarbón

El biocarbón es un producto rico en carbono generado durante la degradación termoquímica de la biomasa mediante procesos como pirólisis, torrefacción y gasificación [49, 50]. Este material ha sido empleado como mejorador de suelos, biocombustible y adsorbente para la remoción de contaminantes en agua, suelo y aire [51, 52]. A nivel de contaminantes gaseosos, el biocarbón puede remover efectivamente vapores metálicos, gases ácidos, ozono, óxidos de nitrógeno y contaminantes orgánicos como COVs y sustancias odorantes [51].

Características como el área superficial, la estructura porosa, los grupos funcionales de la superficie y la alta capacidad de intercambio catiónico permiten que el biocarbón sea un adsorbente potencial de contaminantes [53, 54]. Dichas características dependen de la materia prima empleada y de las condiciones de operación como tiempo de residencia, tasa de calentamiento y temperatura [55]. Adicionalmente, este biomaterial se puede someter a activación, el cual es un proceso químico o físico en el que se mejoran algunas características físicas del biocarbón como el área superficial y la densidad de poros, lo que contribuye a aumentar su capacidad de adsorción [50].

De acuerdo con [56] el biocarbón ha sido empleado en la remoción de olores ofensivos mediante siete aplicaciones: como aditivo en el proceso de compostaje, medio de biofiltración, biocubierta, suplemento

dietario, aditivo al suelo, sustrato para la producción de adsorbentes y directamente como adsorbente. En la Tabla 3 se presentan algunas aplicaciones del biocarbón para el control de olores ofensivos en actividades pecuarias dentro de las cuales se destaca el uso de este material como biocubierta de estiércol, aditivo de alimento de animales y aditivo en el proceso de compostaje.

3.2.5. Oxidación avanzada

Los procesos de oxidación avanzada corresponden a tecnologías en las que se generan especies altamente reactivas como el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), las cuales interactúan con los contaminantes logrando su degradación [61]. Dentro de estos procesos de oxidación avanzada se encuentra la fotocatalisis, la cual es una tecnología que se ha empleado para la remoción de contaminantes en fase gaseosa y cuenta con aplicaciones en unidades pecuarias [62]. La fotocatalisis se basa en una serie de reacciones indirectas de fotooxidación las cuales generan oxidantes en el aire [63].

En esta tecnología se emplea un semiconductor el cual al exponerse a radiación produce la transición de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, formando pares electrón-hueco, los electrones de la superficie interactúan con el oxígeno para producir radicales de superóxido (O_2^-) y los huecos oxidan el agua formando radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$); estos radicales libres reaccionan con los contaminantes gaseosos mineralizándolos en CO_2 y H_2O [64].

Dentro de las ventajas de esta tecnología se destaca que no se requieren químicos o energía externa en los casos que se emplea luz solar, su operación es segura puesto que se opera a condiciones ambiente y su alta capacidad para mineralizar completamente COVs a CO_2 y H_2O . Sin embargo, presenta limitaciones como baja eficiencia de utilización de fotones, tasa lenta de eliminación, es difícil de escalar y ensuciamiento y desactivación de los fotocatalizadores durante la operación prolongada [63].

Tabla 3. Aplicaciones del biocarbón en el control de olores ofensivos de unidades pecuarias.

Tipo de aplicación	Materia prima	Condiciones de elaboración	Observaciones y eficiencias de remoción	Referencias
Aditivo dietario en pollos de engorde.	Madera de haya	No reporta	La emisión de NH ₃ del estiércol se redujo 15% y 14% empleando porcentajes máxicos de biocarbón en la alimentación de 2% y 4% respectivamente.	[56]
Biocubierta de estiércol líquido de ganado lechero.	Astillas gruesas de corteza de abeto de douglas y fibra de madera.	Pirólisis lento a ~600°C	Al emplear una cubierta de biocarbón obtenido mediante pirólisis lenta se logró reducir la concentración promedio de NH ₃ en un 80% y 72%.	[57]
Biocubierta de estiércol de cerdo.	Madera de pino	Pirólisis entre 495°C y 505°C.	Al aplicar dosis de biocarbón de 4.56 kg m ⁻² se obtuvo una reducción en las emisiones de NH ₃ entre 12,7% y 22,6% comparado con las emisiones del control.	[58]
Mezcla de biocarbón en compostaje de camas de aves de corral.	Astillas de pino	Reactor <i>batch</i> a 400°C.	Al emplear una mezcla de compost con 20% de biocarbón, se evidenció una reducción de H ₂ S de 71% y de NH ₃ de 64% comparado con las emisiones generadas por la mezcla de compostaje sin biocarbón.	[59]
Mezcla de biocarbón durante el compostaje de estiércol de gallinas ponedoras.	Tallo de maíz. Madera. Estiércol de gallina ponedora.	Pirólisis entre 450°C y 500°C.	Se encontró que la producción acumulativa de NH ₃ comparada con el control se redujo en 24.8% al emplear biocarbón de tallo de maíz, en 20.1% al emplear biocarbón de madera y en 14.2% empleando biocarbón estiércol de gallinas ponedoras.	[60]

En cuanto aplicaciones de esta tecnología en granjas, [62] evaluaron la remoción de sustancias odorantes generadas por el estiércol de cerdo empleando una unidad móvil de fotocatalisis con TiO₂. En dicha investigación se encontró que al emplear radiación UV-A a 367 nm se logró una reducción de olor de 63%, de p-cresol de 67% y de indol de 32% y al emplear radiación UV-C el porcentaje de reducción fue de 54% de p-cresol y 47% de indol. [65] evaluaron la fotocatalisis con radiación UV-A en el control de emisiones de olores generados en fosas de estiércol de cerdo localizadas bajo los módulos de producción, como resultado se encontró una reducción de olor entre el 32% y 63% y cambios en la percepción del carácter del olor, obteniendo un olor a estiércol más débil con notas de pasta de dientes y menta.

En la literatura, se reportan otros procesos de oxidación avanzada para la remoción de sustancias odorantes. [66] evaluaron la remoción de dimetilsulfuro (DMS) empleado un proceso de oxidación avanzada en fase homogénea con O₃/H₂O₂, como resultado se obtuvo una remoción entre el 95% y 99% de este contaminante, además concluyeron que esta tecnología acoplada con un depurador húmedo

compacto permitiría obtener altas eficiencias de remoción de olores ofensivos. [67] concluyeron que el proceso de oxidación avanzada que combina radiación UV con Ozono es efectivo para reducir la concentración de amoniaco, alcanzando remociones de este contaminante de 97% empleando una baja concentración (30ppm) y un bajo flujo de aire (28m³/h). Para la remoción de compuestos de azufre reducidos se reporta que empleando procesos de oxidación avanzada en fase gaseosa con ozono y luz UV-C se obtuvieron remociones de H₂S de 24,5 % [68]. En otra investigación evaluaron la tecnología de plasma no térmico para la reducción de olores en unidades porcícolas, encontrando altas eficiencias de remoción para indol and 3-metil-1H-indol [69].

4. CONCLUSIONES

Las actividades pecuarias, al emitir olores ofensivos, impactan negativamente la calidad del aire y afectan la salud y comodidad de las comunidades circundantes. Se identificaron 518 publicaciones científicas sobre control y mitigación de olores ofensivos en actividades como la porcícola, avícola y bovina. En la última década, las

tecnologías más investigadas fueron la digestión anaerobia, biofiltración y biopercolación, así como adsorción con biocarbón y procesos de oxidación avanzada. Se subraya que estas tecnologías, especialmente la digestión anaerobia, demostraron ser efectivas en la reducción de emisiones de olores y sustancias odorantes como NH_3 y H_2S .

Se destaca la eficacia de la biofiltración, una opción de bajo costo, y la biopercolación, que trata una amplia gama de contaminantes. En tecnologías físicas, el uso de biocarbón como adsorbente y su aplicación en la dieta animal y compostaje se han investigado. Asimismo, se exploró la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 como una forma avanzada de oxidación para cambiar la percepción del olor y eliminar compuestos como p-cresol e indol. En general, las investigaciones resaltan la factibilidad de implementar prácticas y tecnologías para minimizar el impacto de los olores ofensivos en las actividades pecuarias, contribuyendo así a la mejora del entorno y la salud de las comunidades cercanas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Santiago de Cali por su apoyo financiero en la elaboración de la presente investigación.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores no declaran conflictos de interés.

REFERENCIAS

- [1] R. Sansoucy, "A Driving Force for Food Security and Sustainable Development," *Livestock*, vol. 13–14, pp. 4–11, 1997. <https://doi.org/10.1109/MSP.2006.1593340>
- [2] DANE. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, "Boletín Técnico. Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA)," 2019. <https://doi.org/10.1109/5.771073>
- [3] ICA. Instituto Colombiano Agropecuario, "Censos Pecuarios Nacional," Retrieved July 20, 2022, [https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-](https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018, 2022)
- [4] P. J. Gerber et al., "Tackling Climate Change through Livestock: A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities," *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*, 2013. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2014.424>
- [5] W. E. Burnett, "Determination of Malodors by Gas Chromatographic and Organoleptic Techniques," *Environmental Science & Technology*, vol. 3, no. 8, pp. 744–749, 1969. <https://doi.org/10.1021/AC60024A014>
- [6] D. Hanajima et al., "Key Odor Components Responsible for the Impact on Olfactory Sense during Swine Feces Composting," *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 7, pp. 2306–2310, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.026>
- [7] Y. C. Wang et al., "Emissions, Measurement, and Control of Odor in Livestock Farms: A Review," *Science of the Total Environment*, vol. 776, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145735>
- [8] K. Sucker et al., "Odor Frequency and Odor Annoyance. Part I: Assessment of Frequency, Intensity and Hedonic Tone of Environmental Odors in the Field," *International Archives of Occupational and Environmental Health*, vol. 81, no. 6, pp. 671–682, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00420-007-0259-z>
- [9] L. Capelli et al., "Measuring Odours in the Environment vs. Dispersion Modelling: A Review," *Atmospheric Environment*, vol. 79, pp. 731–743, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.029>
- [10] T. Zarra et al., "Environmental Odour Management by Artificial Neural Network – A Review," *Environment International*, vol. 133, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104939>
- [11] D. Majumdar, "Chapter 4. Air, Noise and Odour Pollution and Control Technologies," in *Environmental Management: Issues and Concerns in Developing Countries*, P. Sikdar, Ed. New Delhi, India: Capital Publishing Company, 2021. https://doi.org/10.1109/978-93-5110-201-5_4
- [12] S. S. Schiffman et al., "Potential Health Effects of Odor from Animal Operations, Wastewater

- Treatment, and Recycling of Byproducts,” *Journal of Agromedicine*, vol. 7, no. 1, pp. 7–81, 2000. https://doi.org/10.1300/J096v07n01_02
- [13] M. T. Piccardo et al., “Odor Emissions: A Public Health Concern for Health Risk Perception,” *Environmental Research*, vol. 204, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112121>
- [14] A. P. Van Harveld, “From Odorant Formation to Odour Nuisance: New Definitions for Discussing a Complex Process,” *Water Science and Technology*, vol. 44, no. 9, pp. 9–15, 2001. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0498>
- [15] A. C. Romain et al., “Continuous Odour Measurement from Fattening Pig Units,” *Atmospheric Environment*, vol. 77, pp. 935–42, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.030>
- [16] T. D. Mahin, “Comparison of Different Approaches Used to Regulate Odours around the World,” *Water Science and Technology*, vol. 44, no. 9, pp. 87–102, 2001. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0516>
- [17] J. Tyndall and J. Colletti, “Mitigating Swine Odor with Strategically Designed Shelterbelt Systems: A Review,” *Agroforestry Systems*, vol. 69, no. 1, pp. 45–65, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10457-006-9017-6>
- [18] K. H. Nahm, “Current Pollution and Odor Control Technologies for Poultry Production,” *Avian and Poultry Biology Reviews*, vol. 14, no. 4, pp. 151–74, 2003. <https://doi.org/10.3184/147020603783701383>
- [19] A. Talaiekhozani et al., “An Overview of Principles of Odor Production, Emission, and Control Methods in Wastewater Collection and Treatment Systems,” *Journal of Environmental Management*, vol. 170, pp. 186–206, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.016>
- [20] I. Wysocka, J. Gębicki, and J. Namieśnik, “Technologies for Deodorization of Malodorous Gases,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 10, pp. 9409–34, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04195-1>
- [21] C. Conti, M. Guarino, and J. Bacenetti, “Measurements Techniques and Models to Assess Odor Annoyance: A Review,” *Environment International*, vol. 134, pp. 1–1, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105261>
- [22] C. Kennes and M. C. Veiga, “Technologies for the Abatement of Odours and Volatile Organic and Inorganic Compounds,” *Chemical Engineering Transactions*, vol. 23, pp. 1–6, 2010.
- [23] K. Barbusinski et al., “Biological Methods for Odor Treatment – A Review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 152, pp. 223–41, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.093>
- [24] N. Donthu et al., “How to Conduct a Bibliometric Analysis: An Overview and Guidelines,” *Journal of Business Research*, vol. 133, pp. 285–96, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- [25] N. J. Van Eck and L. Waltman, “Software Survey: VOSviewer, a Computer Program for Bibliometric Mapping,” *Scientometrics*, vol. 84, no. 2, pp. 523–38, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- [26] M. Hjorth et al., “Nutrient Value, Odour Emission and Energy Production of Manure as Influenced by Anaerobic Digestion and Separation,” *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 29, no. 2, pp. 329–38, 2009. <https://doi.org/10.1051/agro:2008047>
- [27] L. D. Jacobson et al., “Air Emissions from Animal Productions Buildings,” *ISAH*, 2003.
- [28] Y. Li, S. Y. Park, and J. Zhu, “Solid-State Anaerobic Digestion for Methane Production from Organic Waste,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 821–26, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.042>
- [29] C. P. C. Bong et al., “The Characterisation and Treatment of Food Waste for Improvement of Biogas Production during Anaerobic Digestion – A Review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 1545–58, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.199>
- [30] J. Nicolas et al., “Multi-Method Monitoring of Odour Emission in Agricultural Biogas Facilities,” in *Proceedings of the 5th IWA Conference on Odours and Air Emissions*, 2013.
- [31] V. Orzi et al., “Anaerobic Digestion Coupled with Digestate Injection Reduced Odour Emissions from Soil during Manure Distribution,” *Science of the Total Environment*, vol. 621, pp. 168–76, 2018.

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.249>
- [32] V. Orzi et al., "The Role of Biological Processes in Reducing Both Odor Impact and Pathogen Content during Mesophilic Anaerobic Digestion," *Science of the Total Environment*, vol. 526, pp. 116–26, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.038>
- [33] C. Riva et al., "Short-Term Experiments in Using Digestate Products as Substitutes for Mineral (N) Fertilizer: Agronomic Performance, Odours, and Ammonia Emission Impacts," *Science of the Total Environment*, vol. 547, pp. 206–14, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.156>
- [34] M. Zilio et al., "Evaluation of Ammonia and Odour Emissions from Animal Slurry and Digestate Storage in the Po Valley (Italy)," *Waste Management*, vol. 103, pp. 296–304, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.038>
- [35] B. F. Pain et al., "Odour and Ammonia Emissions Following the Spreading of Anaerobically-Digested Pig Slurry on Grassland," *Biological Wastes*, vol. 34, pp. 259–67, 1990.
- [36] M. C. Delhoméie and M. Heitz, "Biofiltration of Air: A Review," *Critical Reviews in Biotechnology*, vol. 25, no. 1-2, pp. 53–72, 2005. <https://doi.org/10.1080/07388550590925383>
- [37] I. Datta and D. G. Allen, "Biofilter Technology," in *Biotechnology for Odor and Air Pollution Control*, Berlin: Springer, 2005.
- [38] S. Mudliar et al., "Bioreactors for Treatment of VOCs and Odours - A Review," *Journal of Environmental Management*, vol. 91, pp. 1039–54, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.01.006>
- [39] M. J. Hansen et al., "Application of Proton-Transfer-Reaction Mass Spectrometry to the Assessment of Odorant Removal in a Biological Air Cleaner for Pig Production," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 60, pp. 2599–2606, 2012. <https://doi.org/10.1021/jf300182c>
- [40] R. W. Melse and J. M. G. Hol, "Biofiltration of Exhaust Air from Animal Houses: Evaluation of Removal Efficiencies and Practical Experiences with Biobeds at Three Field Sites," *Biosystems Engineering*, vol. 159, pp. 59–69, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.04.007>
- [41] K. L. Ho et al., "Microbial Populations Analysis and Field Application of Biofilter for the Removal of Volatile-Sulfur Compounds from Swine Wastewater Treatment System," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 152, pp. 580–88, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.021>
- [42] B. A. Sheridan, T. P. Curran, and V. A. Dodd, "Assessment of the Influence of Media Particle Size on the Biofiltration of Odorous Exhaust Ventilation Air from a Piggery Facility," *Bioresource Technology*, vol. 84, pp. 129–43, 2002.
- [43] M. J. Hansen et al., "Removal of Hydrogen Sulphide from Pig House Using Biofilter with Fungi," *Biosystems Engineering*, vol. 167, pp. 32–39, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.12.004>
- [44] H. Bu et al., "Biotrickling Filter for the Removal of Volatile Sulfur Compounds from Sewers: A Review," *Chemosphere*, vol. 277, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130333>
- [45] P. Rybarczyk et al., "Treatment of Malodorous Air in Biotrickling Filters: A Review," *Biochemical Engineering Journal*, vol. 141, pp. 146–62, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.10.014>
- [46] M. Gospodarek et al., "Comparative Evaluation of Selected Biological Methods for the Removal of Hydrophilic and Hydrophobic Odorous VOCs from Air," *Processes*, vol. 7, 2019. <https://doi.org/10.3390/pr7040187>
- [47] C. Van der Heyden et al., "Long-Term Microbial Community Dynamics at Two Full-Scale Biotrickling Filters Treating Pig House Exhaust Air," *Microbial Biotechnology*, vol. 12, no. 4, pp. 775–86, 2019. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0498>
- [48] L. Deng et al., "Deodorization of the Off-Gas from Livestock Manure Aerobic Composting Tank Using Biotrickling Filters and Its Mechanism," *Biochemical Engineering Journal*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108409>
- [49] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*, 2010.
- [50] A. K. Sakhiya, A. Anand, and P. Kaushal, "Production, Activation, and Applications of Biochar in Recent Times," *Biochar*, vol. 2, pp. 253–85, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108409>

- doi.org/10.1007/s42773-020-00047-1
- [51] W. Gwenzi et al., "Biochars as Media for Air Pollution Control Systems: Contaminant Removal, Applications and Future Research Directions," *Science of the Total Environment*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142249>
- [52] K. O. Iwuozor et al., "A Review on the Thermochemical Conversion of Sugarcane Bagasse into Biochar," *Cleaner Materials*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100162>
- [53] M. R. Chandraiah, "Facile Synthesis of Zero Valent Iron Magnetic Biochar Composites for Pb(II) Removal from the Aqueous Medium," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55, pp. 619–25, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.12.015>
- [54] Q. Wu et al., "Adsorption Characteristics of Pb(II) Using Biochar Derived from Spent Mushroom Substrate," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, 2019. <https://doi.org/10.1038/S41598-019-52554-2>
- [55] A. Kumar et al., "Biochar as Environmental Armour and Its Diverse Role towards Protecting Soil, Water and Air," *Science of the Total Environment*, vol. 806, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150444>
- [56] L. Sobol and A. Dyjakon, "Biochar as a Sustainable Product for the Removal of Odor Emissions - Mini Literature Review," *Revista de Chimie*, vol. 73, no. 4, pp. 86–96, 2022. <https://doi.org/10.37358/RC.22.4.8557>
- B. Dougherty et al., "Can Biochar Covers Reduce Emissions from Manure Lagoons While Capturing Nutrients?" *Journal of Environmental Quality*, vol. 46, pp. 659–66, 2017. <https://doi.org/10.2134/jeq2016.12.0478>
- [57] D. L. Maurer et al., "Pilot-Scale Testing of Non-Activated Biochar for Swine Manure Treatment and Mitigation of Ammonia, Hydrogen Sulfide, Odorous Volatile Organic Compounds (VOCs), and Greenhouse Gas Emissions," *Sustainability*, vol. 9, 2017. <https://doi.org/10.3390/su9060929>
- [58] C. Steiner et al., "Reducing Nitrogen Loss during Poultry Litter Composting Using Biochar," *Journal of Environmental Quality*, vol. 39, pp. 1236–42, 2010. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0337>
- [59] W. Chen et al., "Effects of Different Types of Biochar on Methane and Ammonia Mitigation during Layer Manure Composting," *Waste Management*, vol. 61, pp. 506–15, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.014>
- [60] S. B. Monge et al., "Manual Técnico Sobre de Oxidación Aplicados al tratamiento de Aguas Industriales," España, 2018.
- [61] M. Lee et al., "Mitigation of Odor and Gaseous Emissions from Swine Barn with UV-A and UV-C Photocatalysis," *Atmosphere*, vol. 12, no. 5, 2021. <https://doi.org/10.3390/atmos12050585>
- [62] F. He et al., "Photocatalytic Air Purification Mimicking the Self-Cleaning Process of the Atmosphere," *Nature Communications*, vol. 12, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22839-0>
- [63] S. Weon et al., "Status and Challenges in Photocatalytic Nanotechnology for Cleaning Air Polluted with Volatile Organic Compounds: Visible Light Utilization and Catalyst Deactivation," *Environmental Science: Nano*, vol. 6, pp. 3185–3214, 2019. <https://doi.org/10.1039/c9en00891h>
- [64] M. Lee et al., "Evaluation of TiO₂ Based Photocatalytic Treatment of Odor and Gaseous Emissions from Swine Manure with UV-A and UV-C," *Animals*, vol. 11, 2021. <https://doi.org/10.3390/ani11051289>
- [65] H. Yao et al., "DMS Removal in a Bubble Reactor by Using Peroxone (O₃/H₂O₂) Reactions," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 40, pp. 229–34, 2014. <https://doi.org/10.3303/CET1440039>
- [66] K. Kočí et al., "Degradation of Ammonia from Gas Stream by Advanced Oxidation Processes," vol. 55, no. 4, pp. 433–37, 2019. <https://doi.org/10.1080/10934529.2019.1705105>
- [67] C. Meusinger et al., "Treatment of Reduced Sulphur Compounds and SO₂ by Gas Phase Advanced Oxidation," *Chemical Engineering Journal*, vol. 307, pp. 427–34, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2016.08.092>
- [68] K. B. Andersen et al., "Non-Thermal Plasma for Odour Reduction from Pig Houses - A Pilot Scale Investigation," *Chemical Engineering Journal*, vol. 223, pp. 638–46, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.02.106>
- [69]