



## Biorreactores empleados para la biorremediación de aflatoxinas

### Bioreactors used for the bioremediation of aflatoxins

Sheyla Marilyn Gonzalez-Avila<sup>1</sup>; Cesar Joel Gutiérrez-Ñique<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II s/n, Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

ORCID de los autores

S.M. Gonzalez-Avila: <https://orcid.org/0000-0003-4543-5879>

C.J. Gutiérrez-Ñique: <https://orcid.org/0000-0001-8522-924X>

#### RESUMEN

La toxicidad que tienen los microorganismos como las aflatoxinas que se encuentran en diversas variedades de los alimentos que actualmente son muy consumidos en Perú como en el mundo. Muchos de los alimentos contaminados con aflatoxinas son causantes de enfermedades, una de las principales es la carcinogenicidad. Este estudio tuvo como objetivo evaluar efecto de la concentración ozono/aire y UV en la remediación de aflatoxinas en diferentes cereales o granos de consumo humano. Este estudio revisa la manera en la que se puede desarrollar un nuevo reactor en la cual degrade y desintoxique en una mayor cantidad de aflatoxinas, sin embargo, muchos estudios han verificado que los efectos nocivos de AFB1 se puede reducir en gran medida mediante la irradiación UV en el reactor de fotodegradación y el reactor se puede aplicar a gran escala en la desintoxicación de AFB1 en muchos cereales, así como también en aguas residuales. Por lo tanto, ha tenido un crecimiento en el desarrollo de nuevos reactores del tipo biopelículas y cerrado para reducir la cantidad de esta toxina en los alimentos. La creación de nuevos biorreactores como el de lecho fluidizado resulta muy prometedor para la descontaminación de aflatoxinas en cereales y serían menos peligrosos para los consumidores.

**Palabras claves:** Biorreactores; biopelículas; biodegradación; microorganismo; aflatoxinas.

#### ABSTRACT

The toxicity of microorganisms such as aflatoxins found in various varieties of food that are currently widely consumed in Peru as in the world. Many of the foods contaminated with aflatoxins cause diseases, one of the main ones being carcinogenicity. This study aimed to evaluate the effect of ozone/air and UV concentration on the remediation of aflatoxins in different cereals or grains for human consumption. This study reviews how a new reactor can be developed that degrade and detoxify into more aflatoxins, however, many studies have verified that the harmful effects of AFB1 can be greatly reduced by UV irradiation in the photodegradation reactor, and the reactor can be applied on a large scale in the detoxification of AFB1 of many kinds of cereal, as well as in sewage. Therefore, there has been a growth in the development of new biofilm-type and closed reactors to reduce the amount of this toxin in food. The creation of new bioreactors such as the fluidized bed one is very promising for the decontamination of aflatoxins in cereals and would be less dangerous for consumers.

**Keywords:** Bioreactors; biofilms; biodegradation; microorganism; aflatoxins.

## 1. Introducción

Encontrar un método eficaz para el tratamiento de desinfección de alimentos y de aguas residuales contra las aflatoxinas se ha convertido en una necesidad y un tema de interés en cuanto a su destrucción y debería ser solucionado para evitar que las personas consumidoras de productos contaminados no tengan el riesgo de padecer enfermedades genotóxicas y cancerígenas. La radiación ultravioleta como método físico se ha estudiado durante muchos años para destruir las aflatoxinas; sin embargo, la mayoría de los estudios de desintoxicación UV se llevaron a cabo en un sistema modal, y solo en estado estático para productos irradiados, por lo que su aplicación práctica en la industria alimentaria aún tiene un largo camino por recorrer. Las aguas residuales del procesamiento de alimentos (FPW) contienen altos niveles de aceite y grasa, especialmente de las fábricas que producen comida rápida como nuggets, salchichas y hamburguesas de carne de res, aves y pescado. Según Mahat et al. (2021) investigaron la factibilidad de reemplazar las membranas convencionales para el tratamiento de FPW por membranas dinámicas (DM) de bajo costo. Se operó un biorreactor anaeróbico de MS durante 90 días para evaluar el desempeño del tratamiento usando FPW bajo diferentes tasas de carga orgánica (OLR) de 3,5 a 7,0 g DQO (demanda química de oxígeno) / L día. Una vez que el reactor alcanzó un estado estacionario de eliminación de DQO del 90%, la alimentación al reactor se complementó gradualmente con FPW del 10% al 90% como DQO para permitir las bacterias metanogénicas para aclimatar cualquier posible efecto inhibitorio de su contenido recalcitrante. El biorreactor presentó un rendimiento estable a OLR 5,0 g DQO/L día con un 97,5% de eliminación de DQO y alcanzó una descarga de sólidos suspendidos totales (TSS) de 20 mg/L. Bucalo et al. (2018) desarrolló un novedoso biorreactor integrado de membrana de zanja de oxidación y codigestión anaeróbica de una sola etapa para el reciclaje de desechos de alimentos y aguas residuales de edificios. La codigestión de residuos alimentarios (FW) de una cantimplora con lodos de desecho (WS) de OD-MBR se realizó con la proporción FW:WS de 10:1 en peso. El digestato líquido del proceso de codigestión se cotrató con aguas residuales en el sistema OD-MBR para reutilizar el agua. Se obtuvo un contenido máximo de metano del 65,2% en biogás, un rendimiento específico promedio de 0,24 g CH<sub>4</sub> /g VS (Sólidos Volátiles) con la codigestión anaeróbica de desechos de alimentos

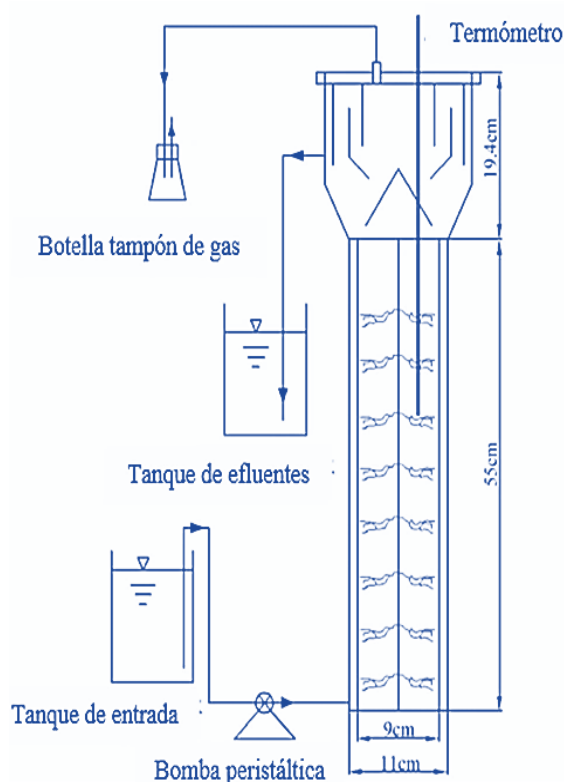
y lodos de desechos de OD-MBR con HRT de 24 h y velocidad de flujo horizontal de 0,3 m/s.

Las aguas residuales de las industrias petrolera y de refinación de petróleo se caracterizan por niveles elevados de hidrocarburos, metales pesados y, a menudo, también de fenoles. Los desechos fecales y domésticos municipales tienen altas concentraciones de contaminantes orgánicos, detergentes y sales de N y P; por lo que usar microorganismos para producir una serie de bienes y servicios (como la biorremediación y la gestión de desechos, los biorreactores a gran escala y la producción de proteínas y productos farmacéuticos recombinantes) es una buena alternativa (Adam et al., 2020).

Jones et al. (2021) desarrollaron un método novedoso para recuperar AGV (ácidos grasos volátiles) de un biorreactor de desperdicios de alimentos de 100 L. La recuperación in situ de AGV aumentó las tasas de producción de 4 a 35 mg AGV g / VS x día al aliviar la inhibición del producto final y detener la metanogénesis; la electrodiálisis pudo concentrar los AGV recuperados a 4000 mg L<sup>-1</sup>. Se recuperó AGV a partir de desperdicios de alimentos, representando un medio prometedor para producir productos químicos de manera sostenible.

La oxidación anaeróbica de amonio se considera el proceso biológico de eliminación de nitrógeno más económico y de bajo consumo energético. Los microorganismos metanotróficos tienen la capacidad de oxidar el metano, microorganismos que tienen un impacto significativo en las emisiones de metano al atenuar los flujos netos de metano a la atmósfera en sistemas naturales y artificiales, aunque las poblaciones son dinámicas en su nivel de actividad en suelos y aguas (Tentori & Richardson, 2020). Se han informado varios casos de intoxicación humana debido a los altos niveles de aflatoxinas exceden los límites designados. La desintoxicación de Aflatoxina B1 (AFB1) del aceite de maní como en otros alimentos contaminados antes del consumo es vital para la salud humana. Cheng et al. (2021) revelaron la relación entre el balance energético neto y la relación C/N, demostrando que la función de tipo sigmoide establecida es capaz de predecir el balance energético (Figura 1).

Debido a la importancia de conocer los sistemas sostenibles de descontaminación de aflatoxinas en cereales, esta revisión tuvo como objetivo evaluar el efecto de la concentración de ozono/aire y ultravioleta (UV) en la remediación de aflatoxinas AFB1 en maíz y arroz mediante un reactor de lecho fluidizado.



**Figura 1.** Reactor de fotodegradación (Adaptado de Chen et al., 2019).

## 2. Presencia de aflatoxinas y microorganismos

### 2.1 Alimentos

El aumento de la demanda de las industrias de alimentos y bebidas en Malasia da como resultado un incremento de la línea de producción, lo que conduce a un mayor volumen de aguas residuales producidas. Las aguas residuales industriales deben someterse a un sistema de tratamiento, que se conoce como Sistema de Tratamiento de Efluentes Industriales (IETS) o Sistema de

Tratamiento de Aguas Residuales (WWTP), antes de que puedan descargarse en los desagües públicos o cuerpos de agua (Muhamad et al., 2021). Los enfoques biológicos incluyen principalmente la adsorción microbiana, degradación de metabolitos microbianos, etc. Estos enfoques aún se encuentran en la etapa de investigación y tienden a formar residuos de subproductos que son indeseables y dañinos. Varios estudios han enfatizado el potencial de la radiación ultravioleta (UV) en la descomposición de AFB1 en el aceite de maní, que es una operación simple, rentable a gran escala y respetuosa con el medio ambiente (Tabla 1).

### 2.2 Aguas residuales

En China, el estándar de nivel A de descarga de contaminantes en plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas (GB 18918-2002) tiene dos tipos, clase A y B. El estándar de descarga de clase A es considerado mucho más alto que el de clase B. Para el nitrógeno amoniacal, el efluente la concentración en clase A y B es de 5 y 8 mg-N/L, respectivamente. Para nitrógeno total (TN), la concentración de efluentes en clase A y B es de 15 mg-N/L y 20 mg-N/L, respectivamente. La concentración de nitrógeno amoniacal en el efluente de las EDAR podría satisfacer la demanda de descarga, mientras que la concentración de nitrato no. El lodo bacteriano en condiciones aerobias y anaerobias comúnmente utilizado en los procesos MBR, tiene limitaciones en cuanto a la degradación de compuestos recalcitrantes en el lixiviado. Aproximadamente el 45 % y el 40 % de la concentración inicial de DQO en condiciones aeróbicas y anaeróbicas (Brito et al., 2019).

**Tabla 1**

Aplicación de los reactores en tratamientos contra aflatoxinas en los alimentos

Alimentos	Reactor	Descripción de los resultados	Referencias
Aceite de maní	Reactor de fotodegradación	Todos los resultados sugieren que los efectos nocivos de AFB1 pueden reducirse en gran medida mediante la irradiación UV en el reactor de fotodegradación, y el reactor puede aplicarse a gran escala en la desintoxicación de AFB1 en aceite de cacahuete en la industria petrolera.	(Diao et al., 2015)
Levadura de cerveza ( <i>Saccharomyces cerevisiae</i> )	Biorreactor de membrana (MBRy)	Se aplicó al tratamiento de lixiviados de vertederos (LFL) para eliminar compuestos orgánicos recalcitrantes, así como para la asimilación de compuestos recalcitrantes.	(Brito et al., 2019)
Alimentos que contienen ácidos grasos volátiles	Biorreactor de membrana sumergida	Se diseñó un novedoso biorreactor anaeróbico de membrana sumergida (iMBR) con sólidas capacidades de limpieza, que incorporó retrolavados frecuentes para soportar el complejo medio AD, para la producción y recuperación in situ de AGV. El iMBR se alimentó con desperdicios de alimentos y se operó sin control de pH, logrando un alto rendimiento de 0,54 g AGV/g VS agregado.	(Joudah & Racoviteanu, 2019)

Se han realizados diversas investigaciones de membranas basadas en nanopartículas de plata para mejorar el rendimiento antibiofouling en el tratamiento de aguas y aguas residuales. Sin embargo, su rendimiento general, como la toxicidad para los microorganismos además de los comportamientos antibioincrustantes, no se

aborda adecuadamente ya que el comportamiento antibioincrustantes y se evaluaron los efectos de las membranas tanto en la actividad del lodo como en la comunidad bacteriana. En la Tabla 2 se presenta los resultados aplicados de tratamiento con biorreactores en diferentes microorganismos en aguas residuales.

**Tabla 2**

Aplicación de los reactores en tratamientos contra diversidad de microorganismos

Microorganismos	Reactor	Descripción de los resultados	Referencias
Microorganismos Halófilos	Biorreactores de membrana osmótica (OsMBR)	los microorganismos tolerantes a la sal en el sistema bioportador de esponja-OsMBR funcionaron de manera eficiente en concentraciones de sal del 2,4%.	(Nguyen et al., 2018; Larbi et al., 2018)
Microorganismos relevantes	Reactor-pila de combustible microbiana	Los productos intermedios de la degradación de X-3B fueron aún más explorado usando cromatografía de gases-espectrometría de masas y una degradación X-3B. Se analizaron comunidades microbianas, ilustra el mecanismo de degradación de X-3B dependía de bioelectroquímica más que en la degradación microbiana.	(Lutsinge & Chirwa, 2018; Fu et al., 2019; Hatamoto et al., 2017)
California brocadia, California kuenenia, y California scalindua, Nitrosomonas, nitrosococo y Nitrosospira	Reactor UASBanammox	Contribuyen a la comprensión de los microorganismos que eliminan nitrógeno en un reactor anammox, lo que facilita la mejora de dichos reactores. Sin embargo, las funciones fisiológicas y metabólicas de la comunidad de arqueas oxidantes de amoníaco en el reactor anammox deben investigarse en estudios adicionales.	(Ding et al., 2017)
Microorganismos	Biorreactor de membrana por desacoplador metabólico	Se operaron tres sistemas MBR paralelos a escala de laboratorio durante 100 días para investigar el efecto inhibitorio de un desacoplador metabólico (3,3',4',5-tetraclorosalicilanilida, TCS) sobre la bioincrustación y el mecanismo potencial para el control de la bioincrustación. La biomasa adherida a la membrana en MBR 2 disminuyó más del 50 % al final de cada período operativo.	(Feng et al., 2020; Qin et al., 2021)
<i>Streptomyces rimosus</i> y <i>Aspergillus terreus</i>	Biorreactor de tanque agitado	Todos los experimentos se realizaron en tres biorreactores funcionando en paralelo (correspondientes a un cocultivo y dos controles de monocultivo respectivos). El análisis (espectrometría de masas y cromatografía líquida) reveló un amplio espectro de más de 40 metabolitos secundarios.	(Boruta, 2021; Han et al., 2017; Oliveira et al., 2020)
<i>Cupriavidus metallidurans</i>	Biorreactor de tambor rotatorio	Los efectos del mercurio y la biorremediación en los microorganismos del ciclo del nitrógeno se estudiaron mediante qPCR. La biorremediación en la RDB eliminó el 82% de mercurio.	(Bravo, Vega-Celedón, Gentina, & Seeger, 2020)
Pseudonocardia	Reactores a escala de laboratorio	Los análisis de la comunidad microbiana revelaron que pseudonocardia los genes pueden contribuir en gran medida a la oxidación inicial de DX, independiente-mente del tipo de portador, lo que sugiere la importancia de esta población para el tratamiento continuo de bajas concentraciones de DX con consorcios microbianos mixtos.	(Inoue et al., 2021).
Microorganismos electroactivos	Reactor bioelectroquímico	Los grupos bacterianos implicados en la eliminación bioelectroquímica de nitrógeno son autótrofos electroactivos y pueden enriquecerse a partir de lodos activados mediante electrodos polarizados. Es un enfoque novedoso recomendado para el tratamiento de aguas residuales ricas en nitrógeno.	(Xing et al., 2017)
Microorganismos Haloalcalifílicos	Reactor Elevación de gas	El uso de gas de síntesis tiene mérito en el proceso de biodesulfuración. Inicialmente, el CO inhibía la reducción de sulfato dependiente de hidrógeno. Sin embargo, después de 30 días la biomasa se adaptó y tanto H <sub>2</sub> y CO se utilizaron como donantes de electrones.	(Plugge et al., 2020)
Microorganismos	Biorreactor de membrana	Los microorganismos pueden adaptarse utilizando aguas residuales reales y tratar PW hasta un cierto nivel de salinidad. A altos niveles de salinidad de PW, la estructura del floculo comenzó a alterarse y se aceleró el ensuciamiento de la membrana.	(Kose Mutlu et al., 2019; Gül et al., 2018; Han et al., 2017)



Las aguas residuales salinas que contienen altas cantidades de sal inorgánica se originan en empresas industriales, como empresas de procesamiento de mariscos y enlatadas de vegetales. En el caso del sector de procesamiento de productos del mar produce grandes volúmenes de aguas residuales salinas con una alta concentración de nutrientes y orgánicos, y convierte el 95% del agua que consume en aguas residuales contaminadas. Se pueden emplear varios métodos, por ejemplo, sistemas biológicos y fisicoquímicos para tratar efluentes salinos; sin embargo, las técnicas fisicoquímicas utilizan grandes cantidades de energía y sus costos de puesta en marcha y operación son elevados (Nguyen et al., 2018).

### 3. Reactores y biorreactores

A través de sistemas de reacción en cadena de la polimerasa (PCR) y PCR en tiempo real, que se pueden aplicar para la producción de metano utilizando reactor anaeróbico mediante el empleo de residuos vegetales como alimentación. Los resultados que se obtuvieron propusieron los nombres de las especies identificadas con los microorganismos hidrolíticos, por ejemplo, *Bacillus subtilis* y arqueas metanogénicas hidrogenotróficas como *Methano culleus* y *Methano corpusculum* de los microbios metanogénicos. (Jayamuthunagai et al., 2019). La evaluación de la operación de dos reactores por lotes secuenciales (SBR) el primero con biomasa granular y el segundo con biomasa en suspensión, ambos para la eliminación de materia orgánica y nitrógeno del efluente de la misma tenería. La evaluación de los SBR implicó estimar la tasa de utilización de los sustratos orgánicos y nitrogenados contenidos en las aguas residuales (AT) de curtiduría por parte de los SBR. Con el sistema de reactor de tanque agitado completamente soportado por membrana, se proporcionan las condiciones adecuadas no solo para una alta producción de bioH<sub>2</sub>, sino también para la producción de permeado libre de sólidos con un contenido de ácidos grasos volátiles de hasta 29 765 mg L<sup>-1</sup>. Así, con el sistema innovador propuesto en este estudio, es posible establecer un modelo de planta adecuado para el concepto de biorrefinería (Akca et al., 2021).

La eliminación bioelectroquímica anaeróbica de nitrógeno se demostró en un reactor discontinuo anaeróbico equipado con un par de bioelectrodos polarizados. El reactor bioelectroquímico se operó en modo discontinuo secuencial después de inocular lodo activado y polarizar el electrodo a 0,6

V. El medio contiene amonio, nitrito, alcalinidad y minerales traza, pero no una fuente de carbono orgánico. Mediante la operación secuencial repetitiva, se mejoraron las eliminaciones simultáneas de amonio, nitrito y alcalinidad, y se confirmó la actividad electroquímica del lodo a granel a partir de los picos redox del voltamograma cíclico. Los sistemas de biodesulfuración que producen azufre elemental operados en condiciones haloalcalinas tienen una eficiencia de convertir sulfuro en azufre elemental en experimentos de laboratorio es cercana al 97% y los modelos sugieren que es posible una eficiencia del 98% (Plugge et al., 2020).

La parte restante del sulfuro se oxida biológicamente a sulfato o químicamente a tiosulfato. Estos compuestos son solubles y se acumulan en el sistema causando una disminución del pH que tiene un impacto negativo porque se requiere un pH alto (> 8,5) para una absorción eficiente del gas de sulfuro de hidrógeno. Para solucionar este problema, se elimina parte del contenido líquido del sistema, generando una corriente de purga con alto pH y alta salinidad y que contiene sulfato y tiosulfato (Ahmadzadeh et al., 2020; Augsburger et al., 2021). Mediante una técnica de encapsulación se preparó una cápsula desnitrificante especial que se diseñó de acuerdo con la teoría de la mala distribución de DO (oxígeno disuelto) para la nitrificación y desnitrificación simultáneas (SND) en un reactor aeróbico. Se investigó a los microorganismos metanotróficos se caracterizan por su capacidad para oxidar el metano. Los metanótrofos oxidan el metano usando metano, enzimas monooxigenasa (MMO) y genes de subunidades seleccionadas de los MMO más comunes. La expresión relativa de estos genes biomarcadores depende de proporciones cobre-biomasa. Relaciones cuantitativas derivadas empíricamente entre metano cantidades de transcripción de biomarcadores de oxidación y la actividad metanotrófica podrían facilitar determinación de las tasas de oxidación del metano (Tentori & Richardson, 2020).

Los biorreactores fluidos en entornos de microgravedad pueden utilizar métodos alternativos de contención y mezcla. La gota de corte anular (RSD) es un dispositivo de mezcla sin recipiente que funciona en microgravedad utilizando la tensión superficial para la contención y mezcla a través de un flujo impulsado interfacialmente. Los resultados en esta investigación demostraron que el KEV puede facilitar el crecimiento de *E. coli* y esa tasa de crecimiento

aumenta logarítmicamente con el aumento de la tasa de rotación del filo de la navaja, similar al método de crecimiento estándar en la Tierra (agitador orbital). Además, se demostró que el KEV es viable para apoyar la expresión de proteínas recombinantes en *E. coli* a niveles comparables a los alcanzados usando métodos de crecimiento estándar (Adam et al., 2020).

Los efluentes de la industria alimentaria generan problemas de contaminación debido a las altas concentraciones de DQO y DBO. En comparación con otras divisiones industriales, la industria alimentaria requiere grandes cantidades de agua. Joudah & Racoviteanu (2019) utilizaron membranas de fibras huecas sumergidas bajo vacío. Se llevaron a cabo dos fases de tratamiento del biorreactor con diferentes TRH (2-8) y (2-24) h. Cho et al. (2018) utilizaron un biorreactor de membrana cerámica anaeróbica (AnCMBR) para la gestión conjunta de varios sustratos orgánicos. Como resultado, el flujo de agua ( $\geq 6,9$  LMH) y la eficiencia de eliminación de materia orgánica ( $\geq 98\%$ ) se mantuvieron por encima de los 25 °C.

#### 4. Ozono y remediación de aflatoxinas

Hay muy pocas investigaciones en los últimos años sobre los tratamientos de degradación de aflatoxinas con ozono y remediación ultravioleta UV, ya que en los últimos años se han realizado diversos estudios como alternativas de solución a este problema:

El tratamiento con ozono ha ganado especial interés como una tecnología de procesamiento de alimentos no térmica, rentable y ecológica. ozono (O<sub>3</sub>) es una forma alotrópica de oxígeno y un poderoso agente oxidante que se disocia naturalmente al liberar el tercer átomo de oxígeno. Torlak et al. (2016) evaluaron la eficacia del ozono gaseoso para la degradación de la aflatoxina B 1 (AFB 1) y la inactivación de la microflora autóctona en la alimentación de las aves. Las muestras de alimentación se trataron con un flujo continuo de dos concentraciones constantes diferentes (2,8 y 5,3 mg/l) de ozono a temperatura ambiente hasta 240 min. El AFB inicial 1el nivel en muestras de alimentos contaminados artificialmente, determinado como 32,8 µg/kg, disminuyó en un 74,3% y 86,4% después de 240 min de exposición a 2,8 y 5,3 mg/L, respectivamente.

Agriopoulou et al. (2016) estudiaron la degradación de las aflatoxinas AFB1, AFB2, AFG1 y AFG2 tras el tratamiento de sus soluciones en agua triplemente destilada con ozono y se probó la capacidad del ozono, incluso en bajas concentraciones, para degradar las aflatoxinas.

Se aplicaron concentraciones de ozono de 8,5, 13,5, 20, 25 y 40 ppm a diferentes temperaturas sobre soluciones de aflatoxinas en agua triplemente destilada de 10 ppb y 2 ppb y se observó la completa y rápida eliminación de AFB1 y AFG1 mientras que AFB2 y AFG2 permanecen más o menos estable.

Khoori et al. (2020) aplicaron técnicas de ozonización, radiación ultravioleta y campo eléctrico pulsado sobre la eliminación de Aflatoxinas totales (AF) y AFM1 en leche probiótica (leche *Acidophilus*). Los resultados mostraron un efecto significativo y sinérgico en todas las variables independientes en la reducción de las cantidades de AFM1 y AF total en la leche acidófila.

Geng et al. (2018) emplearon el método de trazado de rayos para optimizar el diseño de los componentes ópticos (como la remodelación de lentes delgadas para la fuente de luz y la recolección de fluorescencia), la estructura óptica y la geometría de la celda de flujo. Se utilizó un LED UV ordinario a 370 nm y 5 mW como fuente de luz de excitación y un amplificador fotoeléctrico con sensibilidad a la luz de  $10^{-5} \sim 10^{-4}$  lx para la detección de fluorescencia, en lugar de un tubo fotomultiplicador (PMT). El límite de detección más bajo (LOD) del LED-IF fue de 0,077 ppb para la aflatoxina B1 por método HPLC sin derivatización. Se utilizaron barridos de iones de producto LC-MS para identificar y semicuantificar productos fotodegradados de AFB 1 y AFM 1. La radiación UV redujo significativamente las aflatoxinas ( $p < 0,05$ ). En comparación con el control, la exposición máxima a los rayos UV-A redujo la AFB1 y concentraciones de AFM1 a  $78,2 \pm 2,36\%$  (a 836 mJ/cm<sup>2</sup>) y  $65,7 \pm 1,65\%$  (a 857 mJ/cm<sup>2</sup>), respectivamente. Demostraron que el aumento de la dosis de UV-A disminuyó la citotoxicidad inducida por aflatoxinas en las células HepG2, y no se observó citotoxicidad significativa inducida por aflatoxinas con la irradiación UV-A más alta de 777 (AFB 1), 838 (AFM 1) y 746 (AF totales) mJ/cm<sup>2</sup> (Kurup et al., 2022).

Avdeeva et al. (2020) realizaron investigaciones sobre los efectos del producto biológico Biofit-3 en la microflora patógena formada en el grano de trigo. La desinfección del grano mediante una preparación biológica se llevó a cabo en la siguiente secuencia: la preparación biológica se agitó completamente hasta que se disolvió el precipitado. La solución del producto biológico se distribuyó uniformemente en la masa de grano con ayuda de una bomba dosificadora. Asimismo,

se realizaron los experimentos sobre los efectos combinados del producto biológico con el ozono. Entre otros tratamientos para eliminar AFB1, Wang et al. (2016) realizaron un tratamiento con luz pulsada ( $0,52 \text{ J/cm}^2/\text{pulso}$ ) en arroz durante 80 s reduciendo así AFB1 y AFB2 en un 5,0% y 39,2%, respectivamente; mientras que un tiempo de tratamiento de 15 s redujo AFB1 y AFB2 en salvado de arroz en un 90,3% y 86,7%, respectivamente. Según He et al., (2021) tras una revisión bibliográfica determinó que las vías de degradación de AFB1 varían según las diferentes condiciones del tratamiento UV. Una vez identificados los productos fotodegradables, se puede realizar una prueba de Ames o un ensayo de citotoxicidad para determinar la toxicidad. Brito et al. (2019) aplicaron un biorreactor de membrana donde se inoculó con  $10 \text{ g L}^{-1}$  de levadura de panadería comercial y se operó a un tiempo de retención hidráulica de 48 h y pH de 3,5. La demanda específica de aire basada en el área de la membrana (SADm) se mantuvo en  $0,6 \text{ metros } 3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . El MBRy logró demanda química de oxígeno (DQO), color,  $\text{NH}_3$ , y remoción de sustancias húmicas del 68, 79, 68 y 50%, respectivamente. La levadura de panadería comercial demostró ser una excelente fuente de inóculo para MBR, ya que la MBRy mostró una buena eficiencia de eliminación de materia orgánica, nitrógeno y fósforo. Shu et al. (2019) adoptaron perlas magnéticas modificadas con anticuerpo monoclonal de ratón

(McAb) para capturar y enriquecer la micotoxina. Se utilizó radiación UV a 365 nm para inducir la mejora de la emisión fluorescente (FL) del AFB1 capturado con una reacción de adición. Se recogió la señal FL del derivado a 435 nm para cuantificar AFB1. Se mostró un amplio rango de detección de  $1,0$  a  $1000 \text{ ng mL}^{-1}$ , con un límite de detección bajo de  $0,21 \text{ ng mL}^{-1}$  ( $3\sigma$ ) y permite detectar AFB1 en medicamentos a base de hierbas, incluidos *Astragalus membranaceus* y *Salvia miltiorrhiza*, con valores de recuperación aceptables de 95,4 a 107,7%.

## 5. Retos actuales y futuros

La creación de biorreactores tratados con ozono y UV en la remediación de aflatoxinas B1 y moho es muy prometedor, ya que es un problema que está afectando tanto a los productores de cereales (arroz, maíz, entre otros) como también a los consumidores, las empresas procesadoras reducirían en su totalidad la cantidad de productos contaminados y serían menos peligrosos para los consumidores. Los tratamientos con microorganismos inmovilizados con hidrogel son atractivos para una variedad de aplicaciones en biotecnología (Figura 2). Los polisacáridos naturales (p.e. alginatos) y los polímeros sintéticos han adquirido un papel destacado en las técnicas de encapsulación empleando reactores podría ser una alternativa de solución a muchos problemas relacionados con aguas residuales.

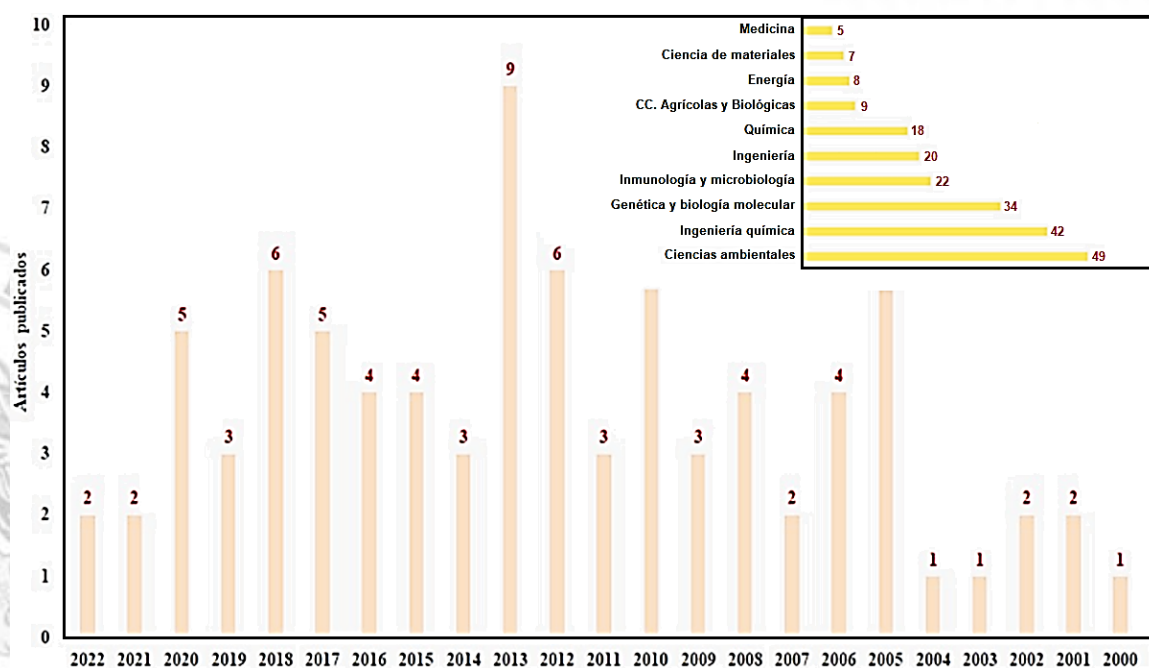


Figura 2. Cantidad de documentos asociados al título ("aflatoxin", "biorreactor", "ozono" y "microorganism", en Scopus.



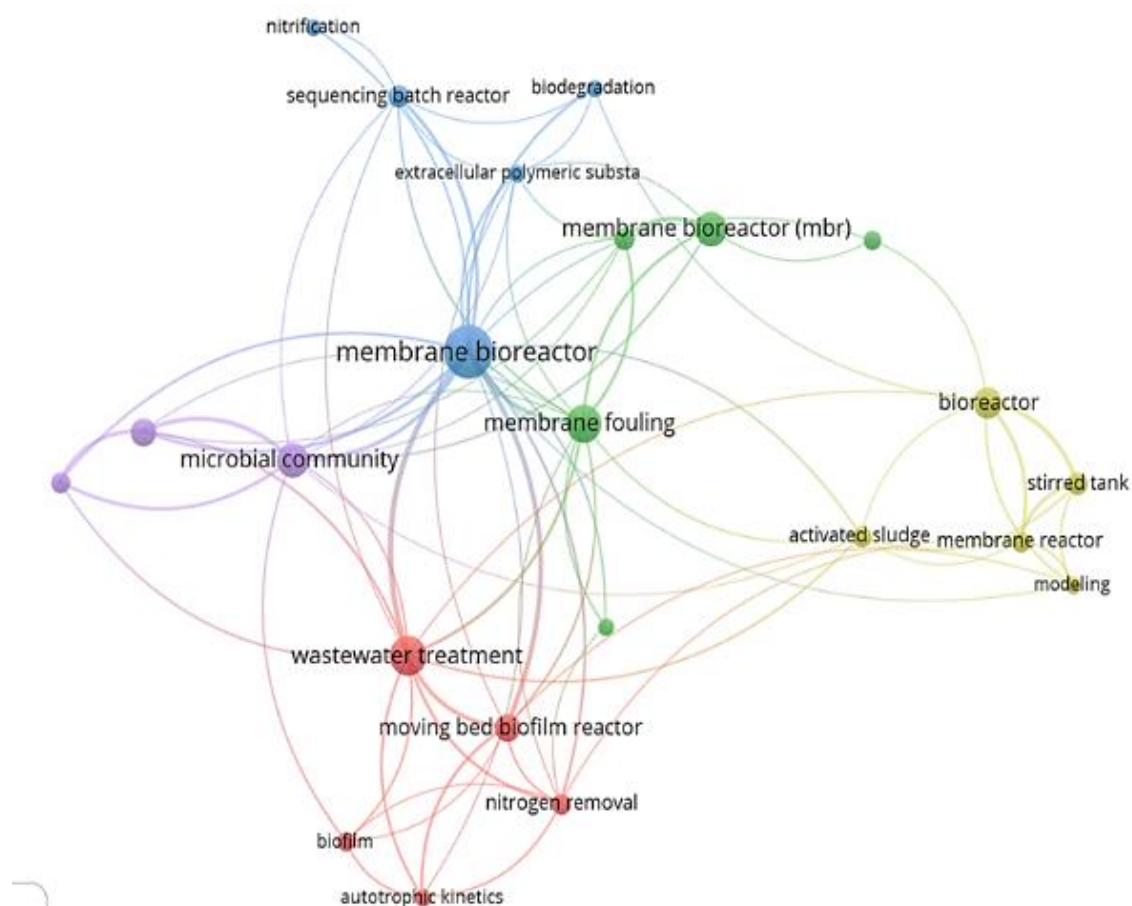


Figura 3. Nivel de coocurrencia con respecto a las palabras clave realizado en el programa VOSviewer.

En la Figuras 3 se muestran 5 cluster que podrían tener relaciones comunes en este tema, cluster 1 (color rojo) relacionado a tratamiento de aguas residuales; cluster 2 (color violeta) relacionado a comunidades microbianas; cluster 3 (color azul) relacionado a los biorreactores; cluster 4 (color verde) relacionado a ensuciamiento de las membranas; y cluster 5 (color amarillo) relacionado a modelación. Esto nos permite conocer las principales temáticas que abarca el estudio de la biotecnología en el tratamiento de la remediación de aflatoxinas.

## 6. Conclusiones

Se investigaron los efectos de los biorreactores en el tratamiento con ozono y UV en la remediación de aflatoxinas lo cual cabe resaltar que estas toxinas representan un alto riesgo para la salud pública ya que son un fuerte carcinógeno o cancerígeno para los humanos y mutagénico (efecto ADN) para las bacterias. Es por ello que se debe tener cuidado ya que, debido a la toxicidad de las aflatoxinas, existen regulaciones estrictas para las aflatoxinas en muchos alimentos, aunque difieren en diferentes países.

Una de las ventajas de la aplicación de ozono en el procesamiento de alimentos es que se puede producir in situ y, a diferencia de los desinfectantes químicos convencionales, no requiere transporte ni almacenamiento. En diversos estudios también se demostró que es posible mantener la actividad hidrolítica del reactor por largos periodos cuando se utiliza fluido ruminal como inóculo. La hidrólisis de biomasa de microalgas con fluido ruminal resultó en altas eficiencias de hidrólisis (hasta 70%).

Se necesitan más estudios sobre alternativas de solución para la degradación y desinfección en productos contaminados por aflatoxinas.

## Referencias bibliográficas

- Adam, J. A., Gulati, S., Hirda, A. H., & Bonocora, R. P. (2020). Growth of microorganisms in an interfacially driven space bioreactor analog. *Npj Microgravity*, 6(1), 1–7.
- Agriopoulou, S., Koliadima, A., Karaiskakis, G., & Kaposos, J. (2016). Kinetic study of aflatoxins' degradation in the presence of ozone. *Food Control*, 61, 221–226.
- Ahmadzadeh, R., Shokrollahzadeh, S., Latifi, S. M., Samimi, A., & Pendashteh, A. (2020). Application of halophilic microorganisms in osmotic membrane bioreactor (OMBR) for reduction of volume and organic load of produced water. *Journal of Water Process Engineering*, 37, 101422.



- Akca, M. S., Bostancı, O., Aydın, A. K., Koyuncu, I., & Altınbas, M. (2021). BioH<sub>2</sub> production from food waste by anaerobic membrane bioreactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(55), 27941–27955.
- Augsburger, N., Zaouri, N., Cheng, H., & Hong, P. Y. (2021). The use of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> to facilitate removal of emerging contaminants in anaerobic membrane bioreactor effluents. *Environmental Research*, 198, 110479. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110479>
- Avdeeva, V. N., Bezgina, J. A., Starodubtseva, G. P., Zorina, E. B., Logacheva, E. A., & Maslova, L. F. (2020). The effect of the ozone and the biological preparation Biofit-3 treatment on the growth of pathogenic microorganisms of wheat during storage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 488(1), 012004.
- Boruta, T., Ścigaczewska, A., & Bizukojć, M. (2021). "Microbial Wars" in a Stirred Tank Bioreactor: Investigating the Co-Cultures of *Streptomyces rimosus* and *Aspergillus terreus*, Filamentous Microorganisms equipped with a rich arsenal of secondary metabolites. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 713639
- Brito, G. C. B., Lange, L. C., Santos, V. L., Amaral, M. C. S., & Moravia, W. G. (2019). Long-term evaluation of membrane bioreactor inoculated with commercial baker's yeast treating landfill leachate: Pollutant removal, microorganism dynamic and membrane fouling. *Water Science and Technology*, 79(2), 398–410.
- Bucalo, M. L., Barbieri, C., Roca, S., Ion Titapiccolo, J., Ros Romero, M. S., Ramos, R., Albaladejo, M., Manzano, D., Mari, F., & Molina, M. (2018). The anaemia control model: Does it help nephrologists in therapeutic decision-making in the management of anaemia? *Nefrologia*, 38(5), 491–502.
- Cheng, H., Li, Y., Hu, Y., Guo, G., Cong, M., Xiao, B., & Li, Y. Y. (2021). Bioenergy recovery from methanogenic co-digestion of food waste and sewage sludge by a high-solid anaerobic membrane bioreactor (AnMBR): mass balance and energy potential. *Bioresource Technology*, 326, 124754.
- Cobzaru, C., & Inglezakis, V. (2015). Ion Exchange. In progress in filtration and separation. Elsevier.
- Cho, K., Jeong, Y., Seo, K. W., Lee, S., Smith, A. L., Shin, S. G., Cho, S. K., & Park, C. (2018). Effects of changes in temperature on treatment performance and energy recovery at mainstream anaerobic ceramic membrane bioreactor for food waste recycling wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 256(February), 137–144.
- Diao, E., Shen, X., Zhang, Z., Ji, N., Ma, W., & Dong, H. (2015). Safety evaluation of aflatoxin B1 in peanut oil after ultraviolet irradiation detoxification in a photodegradation reactor. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(1), 41–47.
- Ding, Z. W., Lu, Y. Z., Fu, L., Ding, J., & Zeng, R. J. (2017). Simultaneous enrichment of denitrifying anaerobic methane-oxidizing microorganisms and anammox bacteria in a hollow-fiber membrane biofilm reactor. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101(1), 437–446.
- Feng, X., Guo, W., Zheng, H., Yang, S., Du, J., Wu, Q., Luo, H., Zhou, X., Jin, W., & Ren, N. (2020). Inhibition of biofouling in membrane bioreactor by metabolic uncoupler based on controlling microorganisms accumulation and quorum sensing signals secretion. *Chemosphere*, 245, 125363.
- Geng, X., Wang, N., Gao, Y., Ning, H., & Guan, Y. (2018). A novel HPLC flow cell integrated UV light emitting diode induced fluorescence detector as alternative for sensitive determination of aflatoxins. *Analytica Chimica Acta*, 1033, 81–86.
- Gül, B. Y., Imer, D. Y., Park, P. K., & Koyuncu, I. (2018). Evaluation of a novel anti-biofouling microorganism (*Bacillus* sp. T5) for control of membrane biofouling and its effect on bacterial community structure in membrane bioreactors. *Water Science and Technology*, 77(4), 971–978.
- Han, X., Wang, Z., Chen, M., Zhang, X., Tang, C. Y., & Wu, Z. (2017). Acute Responses of Microorganisms from Membrane Bioreactors in the Presence of NaOCl: Protective Mechanisms of Extracellular Polymeric Substances. *Environmental Science and Technology*, 51(6), 3233–3241.
- Hatamoto, M., Sato, T., Nemoto, S., & Yamaguchi, T. (2017). Cultivation of denitrifying anaerobic methane-oxidizing microorganisms in a continuous-flow sponge bioreactor. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101(14), 5881–5888.
- He, J., Evans, N. M., Liu, H., Zhu, Y., Zhou, T., & Shao, S. (2021). UV treatment for degradation of chemical contaminants in food: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(2), 1857–1886.
- Inoue, D., Yoshikawa, T., Okumura, T., Yabuki, Y., & Ike, M. (2021). Treatment of 1,4-dioxane-containing water using carriers immobilized with indigenous microorganisms in landfill leachate treatment sludge: A laboratory-scale reactor study. *Journal of Hazardous Materials*, 414(February), 125497.
- Jayamuthunagai, J., Bharathiraja, B., Aberna Ebenezer Selvakumari, I., & Varjani, S. (2019). Polymerase chain reaction and real-time PCR parameters for amplification of hydrolytic microorganisms and hydrogenotrophic methanogens in anaerobic bioreactor. *Indian Journal of Biotechnology*, 18(3), 246–252.
- Jones, R. J., Fernández-Feito, R., Massanet-Nicolau, J., Dinsdale, R., & Guwy, A. (2021). Continuous recovery and enhanced yields of volatile fatty acids from a continually-fed 100 L food waste bioreactor by filtration and electro dialysis. *Waste Management*, 122, 81–88.
- Joudah, A. S. A., & Racoviteanu, G. (2019). Membrane Bioreactors Used for Treatment of Food Industry Effluents. *E3S Web of Conferences*, 85, 1–8.
- Khoori, E., Hakimzadeh, V., Mohammadi Sani, A., & Rashidi, H. (2020). Effect of ozonation, UV light radiation, and pulsed electric field processes on the reduction of total aflatoxin and aflatoxin M1 in acidophilus milk. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(10), 1–8.
- Kose Mutlu, B., Ozgun, H., Ersahin, M. E., Kaya, R., Eliduzgun, S., Altınbas, M., Kinaci, C., & Koyuncu, I. (2019). Impact of salinity on the population dynamics of microorganisms in a membrane bioreactor treating produced water. *Science of the Total Environment*, 646, 1080–1089.
- Kurup, A. H., Patras, A., Pandyala, B., Vergne, M. J., & Bansode, R. R. (2022). Evaluation of Ultraviolet-Light (UV-A) Emitting Diodes Technology on the Reduction of Spiked Aflatoxin B1 and Aflatoxin M1 in Whole Milk. *Food and Bioprocess Technology*, 15, 165–176
- Larbi, B., Ltaief, A., Hawari, A. H., Du, F., Baune, M., & Thöming, J. (2018). Impact of Pulsed Dielectrophoretic Supply on the Function of Microorganisms in Membrane Bioreactors. *Journal of Environmental Engineering*, 144(4), 1–8.
- Levenspiel, O. (1993). Flujo de fluidos e intercambio de calor. In Reverté S.A.
- Lutsinge, T. B., & Chirwa, E. M. N. (2018). Biosurfactant-assisted biodegradation of fluoranthene in a two-stage continuous stirred tank bio-reactor system using microorganism. *Chemical Engineering Transactions*, 64, 67–72.
- Mahat, S. B., Omar, R., Che Man, H., Mohamad Idris, A. I., Mustapa Kamal, S. M., Idris, A., Shreeshivadasan, C., Jamali, N. S., & Abdullah, L. C. (2021). Performance of dynamic anaerobic membrane bioreactor (DAnMBR) with phase separation in treating high strength food processing wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105245.
- Muhamad Ng, S. N., Idrus, S., Ahsan, A., Tuan Mohd Marzuki, T. N., & Mahat, S. B. (2021). Treatment of wastewater from a food and beverage industry using conventional wastewater treatment integrated with membrane bioreactor system: A pilot-scale case study. *Membranes*, 11(6), 11060456.
- Nguyen, N. C., Chen, S. S., Nguyen, H. T., Chen, Y. H., Ngo, H. H., Guo, W., Ray, S. S., Chang, H. M., & Le, Q. H. (2018). Applicability of an integrated moving sponge biocarrier-osmotic membrane bioreactor MD system for saline wastewater treatment using highly salt-tolerant microorganisms. *Separation and Purification Technology*, 198, 93–99.
- Oliveira, F. de, Lima, C. de A., Lopes, A. M., Marques, D. de A. V., Druzian, J. I., Júnior, A. P., & Santos-Ebinuma, V. C. (2020). Microbial colorants production in stirred-tank bioreactor and their incorporation in an alternative food packaging biomaterial. *Journal of Fungi*, 6(4), 1–14.
- Plugge, C. M., Sousa, J. A. B., Christel, S., Dopson, M., Bijmans, M. F. M., Stams, A. J. M., & Diender, M. (2020). Syngas as electron

- donor for sulfate and thiosulfate reducing haloalkaliphilic microorganisms in a gas-lift bioreactor. *Microorganisms*, 8(9), 1–18.
- Qin, S., Wainaina, S., Awasthi, S. K., Mahboubi, A., Liu, T., Liu, H., Zhou, Y., Liu, H., Zhang, Z., Taherzadeh, M. J., & Awasthi, M. K. (2021). Fungal dynamics during anaerobic digestion of sewage sludge combined with food waste at high organic loading rates in immersed membrane bioreactors. *Bioresource Technology*, 335, 125296.
- Shu, Q., Wu, Y., Wang, L., & Fu, Z. (2019). A label-free immunoassay protocol for aflatoxin B1 based on UV-induced fluorescence enhancement. *Talanta*, 204, 261–265.
- Tentori, E. F., & Richardson, R. E. (2020). Importance Methanotrophs are naturally occurring microorganisms capable of oxidizing methane and have an impact on global net methane emissions. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(23), 1–42.
- Torlak, E., Akata, I., Erci, F., & Uncu, A. T. (2016). Use of gaseous ozone to reduce aflatoxin B1 and microorganisms in poultry feed. *Journal of Stored Products Research*, 68, 44–49.
- Wang, B., Mahoney, N. E., Pan, Z., Khir, R., Wu, B., Ma, H., & Zhao, L. (2016). Effectiveness of pulsed light treatment for degradation and detoxification of aflatoxin B1 and B2 in rough rice and rice bran. *Food Control*, 59, 461–467.
- Xing, Z. L., Zhao, T. T., Gao, Y. H., Yang, X., Liu, S., & Peng, X. Y. (2017). Methane oxidation in a landfill cover soil reactor: Changing of kinetic parameters and microorganism community structure. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 52(3), 254–264.

