REVISTA CIENTÍFICA DE

INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

VOLUMEN 4 NÚMERO 1



Universidad La Salle Oaxaca

ÍNDICE

CARTA EDITORIAL	**5**
Impactos ambientales por residuos sólidos generados durante la pandemia de COVID-19 y alternativas de solución	**8**
Análisis de biopesticida con dosificación controlada de *Bacillus thuringiensis* soportado en hidrotalcitas híbridas mediante inteligencia artificial	**19**
Efecto del arbolado en la infraestructura urbana del boulevard 5 de mayo de la ciudad de Puebla, México	**27**
Potencial de la espirulina (Arthrospira spp. y Spirulina spp.) en la producción de biocombustibles: una revisión de técnicas y avances	**40**
Propuesta de estrategias de gestión de residuos sólidos en la ciudad de Santa Ana, el Salvador	**59**

Aviso de Privacidad

Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura

La Universidad La Salle Oaxaca A.C., con domicilio en Camino a San Agustín No. 407, Colonia Santa Cruz Xoxocotlán Oaxaca, Oaxaca, C.P. 71230, es responsable del tratamiento de sus datos personales en términos de lo establecido por el artículo 3º fracción XIV de la Ley Federal de Protección de Datos Personales en Posesión de Particulares (LFPDPPP). Los datos personales generales recabados de manera electrónica en este formulario como lo son: nombre completo, correo electrónico personal e institución o lugar de procedencia, serán utilizados para el llenado del formulario de registro que le permitirá tener acceso para publicar o proponer artículos para su exposición en" La Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura" de la Universidad La Salle Oaxaca. Si usted tiene alguna duda sobre el manejo de los datos personales o desea ejercer sus derechos de acceso, rectificación, cancelación u oposición, o bien quiere conocer nuestro aviso de privacidad integral, puede hacerlo entrando a nuestro sitio web: web www.ulsaoaxaca.edu.mx.

Información legal

Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura, año 4, no. 1, junio 2025, es una publicación semestral (Enero-Junio) editada por la Universidad La Salle Oaxaca, A.C. Camino a San Agustín 407, Santa Cruz Xoxocotlán, C.P. 71230, Oaxaca, México. Tel. (951) 52 9333. Página electrónica de la revista: https://revistas.ulsaoaxaca.edu.mx/RCIA. Editora responsable: Arq. Karime Yasmín Hernández Matus (correo electrónico: revistacientifica.eia@ulsaoaxaca.edu.mx) Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título 04-2024-030511234100-102, ISSN: 3061-7154, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Arq. Karime Yasmín Hernández Matus, revistacientifica.eia@ulsaoaxaca.edu.mx, Universidad La Salle Oaxaca, A.C. Camino a San Agustín 407, Santa Cruz Xoxocotlán, C.P. 71230, Oaxaca, México. Fecha de la última modificación, 15 de junio de 2025

Carta Editorial

Apreciables lectores:

Me complace saludarles y presentar el primer volumen de este año de la Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura (RCIA), publicación académica arbitrada y de acceso abierto editada por la Universidad La Salle Oaxaca. Este número reúne cinco artículos que exploran temáticas de gran relevancia y actualidad en los campos de la ingeniería y la arquitectura, en consonancia con la misión de la RCIA de impulsar la investigación, la innovación y la divulgación científica en estas disciplinas. En esta edición, destaca el enfoque en proyectos de carácter ambiental, resultado de la colaboración activa de la Universidad La Salle Oaxaca con el VI Simposio y VII Seminario Internacional de Educación Ambiental y Desarrollo Sustentable. Varios de los artículos aquí presentados surgieron a partir de este importante encuentro académico, lo que refleja el compromiso de la revista y de la universidad en fortalecer la investigación interdisciplinaria orientada a la sostenibilidad y la protección del entorno. Esta vinculación estratégica no solo enriquece el contenido de la RCIA, sino que también consolida la cooperación entre instituciones de educación superior, promoviendo la generación y difusión de conocimiento que contribuye a enfrentar los desafíos ambientales contemporáneos. Invitamos a la comunidad académica y profesional a sumarse a este esfuerzo colectivo, consultando y participando activamente en la RCIA, una revista que se distingue por su apertura, rigor y compromiso con el avance científico y social.

Lo anterior expresa como la problemática ambiental y sustentable puede abordarse desde diversas áreas del conocimiento con una visión transversal, lo cual es reflejada en esta revista al publicar artículos de investigación, así como revisiones sistemáticas dentro de las disciplinas de las ingenierías y arquitectura. Aunque en esta edición encontrará más aportaciones al conocimiento en materia ambiental, desde una visión de las ingenierías, como es el caso del artículo titulado: "Impactos ambientales por residuos sólidos generados durante la pandemia COVID-19 y alternativas de solución", donde los autores analizaron información referente a los impactos ambientales provocados por los residuos sólidos generados durante la pandemia, esto a través de la búsqueda sistemática en diversas bases de datos, la cual enfatizan la importancia de realizar un trabajo interdisciplinario en áreas de la salud, ambientales, sociales y políticos para hacer frente a los desafíos generados por la postpandemia en temas de gestión de residuos.

El segundo artículo que lleva por nombre: "Análisis de biopesticida con dosificación controlada de *Bacillus thuringiensis* soportado en hidrotalcitas híbridas mediante inteligencia artificial", los autores proponen mejoras en la eficacia de este biopesticida a través de un modelo de inteligencia artificial, la cual plantean como alternativa de impulsar una agricultura sostenible en miras de optimizar este tipo de tecnología aplicada.

Siguiendo el orden de los manuscritos presentados, el trabajo titulado: "Efecto del arbolado en la infraestructura urbana del boulevard 5 de mayo de la ciudad de Puebla, México", propone determinar la diversidad del arbolado en esta avenida de mayor tránsito en la capital poblana, y sobre la importancia de realizar una planificación oportuna para el manejo y selección de especies arbóreas en áreas conurbadas.

El cuarto artículo "Potencial de la espirulina (Arthrospira spp. y Spirulina spp.) en la producción de biocombustibles: una revisión de técnicas y avances", proponen una revisión de técnicas de edición genética aplicada a microalgas. Lo anterior los lleva a señalar la relevancia de marcadores metabólicos y sistemas basados en la resistencia de antibióticos para la optimización de la espirulina en el sector industrial.

El ultimo escrito titulado “Propuesta de estrategias de gestión de residuos sólidos en la ciudad de Santa Ana, El Salvador”, propone determinar estrategias más adecuadas para la gestión integral de los residuos, donde hace énfasis en la importancia de emplear el biogás generado en la digestión anaerobia de los componentes residuales, con el fin de impulsar la sustentabilidad en estos procesos.

Si bien la mayor parte de estos artículos están orientados, desde la visión de las ingenierías, a la gestión de residuos sólidos y aspectos agronómicos. El trabajo de arbolado con relación a la infraestructura urbana tiene una estrecha relación con la arquitectura, donde se busca esta relación ambiental entre los árboles y la planificación urbana, como parte de la técnica para diseñar espacios y estructuras con una visión sustentable.

Para finalizar, mi reconocimiento y agradecimiento a todos los autores, investigadores y colaboradores que hicieron posible esta edición. Por tanto, se espera que los artículos aquí presentados sean un aliciente para el impulso de nuevas ideas, y que estos proyectos contribuyan a fortalecer el conocimiento en materia de ingeniería y arquitectura, así como su aplicación social de estos temas, desde una perspectiva de la sustentabilidad y la educación ambiental.

Dr. Erasmo Velázquez Cigarroa
Investigador posdoctoral SECIHTI en el Centro de Gestión del Desarrollo, Universidad Autónoma de Guerrero

Derechos de Autor© 2025 Velázquez Cigarroa, Erasmo



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Impactos ambientales por residuos sólidos generados durante la pandemia de COVID-19 y alternativas de solución

Leticia Narciso Ortiz[1], Carolina Peña Montes[2], Manuel Alejandro Lizardi Jiménez[3*]

DOI: 10.56643/rcia.v4i1.199

Como citar este artículo: Narciso-Ortiz, L., Peña-Montes, C., & Lizardi-Jiménez, M. A. (2025). Impactos ambientales por residuos sólidos generados durante la pandemia de COVID-19 y alternativas de solu-ción. *Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura.* 4(1). 8-18. DOI: https://doi.org/ 10.56643/rcia.v4i1.199

Resumen

En marzo de 2020 se declaró el inicio de la pandemia Covid-19; una de las recomendaciones para hacer frente a la misma fue el uso de cubrebocas. Como consecuencia de ello, aumentó la producción y la generación de residuos de equipo de protección. El objetivo de este trabajo fue analizar y resumir información referente a los impactos ambientales provocados por los residuos sólidos generados durante la pandemia y presentar investigaciones que ofrezcan alternativas de solución. Con este propósito se utilizaron motores de búsqueda científicos incluyendo palabras clave en español e inglés. Se encontró que los ecosistemas marinos son los más afectados, ya que el equipo de protección se fabrica con polímeros no degradables; éstos se convierten en microplásti-cos, que afectan la flora, la fauna y arrastran otros contaminantes.

El uso de organismos para la biodegradación de estos residuos y el empleo de materiales bio-degradables para la fabricación del equipo de protección constituyen alternativas de solución de esta problemática.

Se concluye que uno de los principales problemas que dan lugar a la mala disposición de resi-duos es la falta de educación ambiental de las autoridades y la población en general. Es impor-tante que el gobierno establezca planes de gestión de residuos. Se puede reconocer, entonces, que la pospandemia demanda la realización de trabajo interdisciplinario de las áreas de la salud, sociales, ambientales y políticas.

Palabras clave: Ambiente, biodegradación, bioplásticos, contaminación, mascarillas, plásticos.

Abstract

In March 2019, the COVID-19 pandemic was declared; one of the recommendations was the use of face masks. As a result, the production and generation of protective equipment waste increased. The objective of this work was to analyze and summarize information regarding the environmental impacts caused by the solid waste generated during the pandemic; and to present research with alternative solutions. Scientific search engines were used with keywords in Spanish and English. It was found that marine ecosystems are the most affected, as the protective equipment is made from non-degradable polymers, which turn into microplastics, affecting flora, fauna, and dragging other contaminants.

1Maestra en Ciencias de los Alimentos y Biotecnología, Tecnológico Nacional de México, campus Veracruz. Estudiante de Doctorado en Ciencias en Alimentos en la Unidad de Investigación de Alimentos (UNIDA). ORCID: 0000-0002-5240-6411. Correo electrónico: D20020009@veracruz.tecnm.mx
2Doctora en Ciencias Bioquímicas, Tecnológico Nacional de México, campus Veracruz. Profesora investigadora y Jefa de Laboratorio de Genética Aplicada de la Unidad de Investigación de Alimentos (UNIDA). ORCID: 0000-0002-4767-1210. Correo electrónico: carolina.pm@veracruz.tecnm.mx
3 Doctor en Biotecnología, SECIHTI- Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Investigador por México de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). ORCID: 0000-0002-2054-5556. Correo electrónico de correspondencia: manuel.lizardi@uaslp.mx
Recibido: 01/12/2024| Aceptado: 24/02/2025 | Publicado: 15/06/2025
Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

Alternative solutions include the use of organisms for the biodegradation of these wastes and the use of biodegradable materials for the manufacture of protective equipment. It can be concluded that one of the main problems of improper waste disposal is the lack of environmental education among authorities and the general population. It is also important for the government to establish waste management plans. It can be recognized then that the post-pandemic demands interdisciplinary work from the fields of health, social, environmental, and political areas.

Keywords: Biodegradation, bioplastics, environment, masks, plastics, pollution.

Introducción

Finalizando el mes de diciembre de 2019 se presentó un brote de neumonía desconocida en Wuhan, China. El Chinese Centers for Disease Control and Prevention (ccdc) identificó al virus causante de estos padecimientos como un nuevo coronavirus llamado sars-CoV-2, por sus siglas en inglés Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2, que genera el síndrome respiratorio o Covid-19 (Xie y Chen, 2020). El Covid-19 fue declarado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como una pandemia mundial en marzo de 2020 (OMS, 2020a).

Una pandemia es definida como una epidemia que ocurre en todo el mundo o en un área muy amplia, que cruza fronteras internacionales y generalmente afecta a un gran número de personas (Kelly, 2011). En este caso se inició en China, extendiéndose rápidamente por todo el mundo y provocando cifras insólitas de personas contagiadas. Tan sólo en México se reportaron 7.3 millones de casos a junio de 2023 (Conahcyt, 2023).

La Covid-19 se transmite a través de microgotas (5 - 10 µm) generadas por una persona infectada al toser, estornudar o exhalar; ya sea por contacto directo o con superficies que se encuentren en el entorno (OMS, 2020b).

Para limitar la propagación del virus se emplearon varias medidas, entre ellas el distanciamiento social, el lavado frecuente de manos y el uso de equipo de protección personal (EPP), como las mascarillas o cubrebocas.

El uso de estos últimos se consideró un enfoque importante para frenar la propagación del SARS-CoV-2 (Berthel et al., 2022; Sharma et al., 2023).

La pandemia de Covid-19 provocó estragos que siguen siendo perceptibles, por ejemplo, la disminución de la actividad comercial de distintas empresas (Arellano-Varona et al., 2023) y el notorio daño al medio ambiente, ya que, debido al uso frecuente de EPP durante y después de la pandemia, los residuos aumentaron.

El objetivo de este trabajo fue analizar y resumir información referente a los impactos ambientales provocados por los residuos sólidos generados durante la pandemia, específicamente cubrebocas o mascarillas, sobre todo en ecosistemas marinos, y presentar investigaciones que ofrezcan alternativas de solución.

Metodología

Se realizó una revisión de literatura a través del repositorio digital Google Academic, empleando las palabras clave: contaminación plástica, mascarillas, Covid-19, biodegradación mascarillas y producción mascarillas biodegradables, en español y en inglés. Se tomaron en cuenta la información publicada a partir de 2020 y los trabajos de mayor relevancia de acuerdo con el número de citas registradas.

Finalmente, se sintetizaron los tópicos más importantes y se organizaron en los siguientes apartados: *Equipo de protección personal,* con énfasis en mascarillas; *Impactos ambientales de los residuos de protección personal,* especialmente en ambientes marinos y Alternativas de solución, dividido en biodegradación de mascarillas y producción de mascarillas con compuestos biodegradables.

Equipo de protección personal

El uso de EPP, como las mascarillas, se considera un dispositivo importante de prevención y control para minimizar la transmisión de la Covid-19. Las mascarillas de un solo uso son fabricadas con plásticos de origen petroquímico, como el polipropileno, y se componen de tres capas (Berthel et al., 2022). Las más utilizadas son las mascarillas N95, ya que su eficiencia es excelente y filtran más de 95% de las partículas con un diámetro de 0.3 μm suspendidas en el aire (Gope et al., 2020).

La pandemia de Covid-19 orilló a la población a usar miles de millones de mascarillas (Sharma et al., 2023). En marzo de 2020, incluso, la OMS (2020c) exhortó a la industria a aumentar la producción en 40%, ya que se estimaba la necesidad de contar con 89 millones de mascarillas al mes para hacer frente a la pandemia de Covid-19. Para junio de ese mismo año China estaba produciendo 200 millones de mascarillas al día, esto es, 20 veces más de lo que producía en febrero de 2020 (Aragaw, 2020). En cuanto a la demanda de mascarillas, *Plastic Innovation Hub* reportó que en el Reino Unido ésta ascendió a 24.37 billones de mascarillas al año (Li et al., 2022). No se tiene un número exacto de las mascarillas utilizadas en México, pero la encuesta *The Global Covid-19 Trends and Impact* posicionó a nuestro país como el tercero que más cubrebocas utiliza en América Latina (El Sol de Puebla, 2024).

Lamentablemente, una vez utilizadas, las mascarillas son desechadas sin tener en cuenta medidas de protección, lo que conduce a la acumulación y amontonamiento de desechos de residuos plásticos en el medio ambiente. La fundación OceansAsia proporcionó cifras impresionantes tras realizar un estudio en el que estimó que, en 2020, alrededor de 1.56 billones de mascarillas habrían ingresado a los océanos (OceansAsia Foundation, 2020).

Por tratarse de un residuo médico peligroso, se recomendaba colocar las mascarillas en centros de reciclaje para su incineración; sin embargo, este proceso libera gases nocivos para el ambiente y la salud humana (Nagy y Kuti, 2016). Por lo que en la mayoría de los casos estos residuos terminan en contenedores de basura o en la calle, llegando eventualmente a los ecosistemas, principalmente marinos.

Impactos ambientales ocasionados por los residuos de protección personal

El uso masivo de mascarillas desechables provocado por la pandemia de Covid-19 y la mala disposición de estos residuos incrementaron la contaminación por plásticos ya existente en el medio marino. Ello responde a que la mayoría de las mascarillas de un solo uso se caracterizan por su baja biodegradabilidad, lo que las convierte en un problema de salud pública que afecta a los ecosistemas y la población en general (Berthel et al., 2022; Soo et al., 2022).

En México, durante la pandemia, los desechos médicos de EPP, material biológico y hasta ataúdes excedieron la capacidad del país. En 2020 tuvo lugar un conocido evento: la Deutsche Welle publicó una noticia en la que señalaba que el gobierno de la Ciudad de México había encontrado 3.5 t (toneladas) de residuos médicos y tejido humano parcialmente incinerado en la localidad

boscosa de Nicolás Romero, así como 6 000 metros cúbicos de residuos similares en un tiradero clandestino en Puebla. La noticia se acompañaba de fotografías impresionantes (Deutsche Welle, 2020). Aunque no se tiene una cifra exacta del número de mascarillas utilizadas en nuestro país, Gómez-Tagle y Cilia-López (2021) estimaron por medio de una ecuación el número de cubrebocas que podían desecharse en las ciudades más pobladas de México, los resultados que obtuvieron indican que en el año 2021 se desechaban 43 606 224 cubrebocas diariamente.

Las mascarillas desechadas en el ambiente son una fuente de microplásticos (mp) y contaminantes químicos, lo que constituye un sustrato para la colonización de especies invasoras y una amenaza potencial de enredo, ingestión y/o infección entre depredadores, principalmente en ecosistemas acuáticos (Ben-Haddad et al., 2021). Los MP son partículas de plástico con un tamaño menor a 5 mm, que pueden actuar como vectores absorbiendo distintos contaminantes químicos, metales, pesticidas e hidrocarburos (Torres et al., 2021). Los MP se han encontrado en el plancton (Lin, 2016), en moluscos (De la Torre et al., 2020), en crustáceos (Goldstein y Goodwin, 2013), peces (Digka et al., 2018), tortugas marinas (Di Renzo et al., 2021) y hasta en mamíferos marinos (Merrill et al., 2023; Santillán et al., 2020).

Aunado a ello, las mascarillas sólo filtran los microorganismos o virus, pero no los eliminan, lo que conduce a un mayor riesgo de contaminación cruzada al desechar durante la eliminación de las mascarillas, y aumenta aún más los problemas ambientales ocasionados por las malas prácticas de eliminación (Sharma et al., 2023). Estos residuos médicos mal gestionados son la principal fuente de infección de pacientes, trabajadores de la salud, recolectores de basura y público en general (Gómez-Tagle y Cilia-López, 2021). Los países de América Latina son particularmente vulnerables, lo que les impide garantizar una gestión adecuada de las mascarillas utilizadas porque no son autosuficientes.

Por otro lado, pero no menos importante, la falta de educación ambiental lleva a que la población contamine directamente. Al respecto, podemos analizar un estudio que se realizó en 2021 en Agadir, Marruecos (Ben Haddad et al., 2021). En este lugar turístico se recolectaron 689 artículos de protección en las playas públicas, de los cuales 96.8% eran mascarillas. Los resultados mostraron que en los puntos de muestreo en los que se concentró un mayor número de turistas se encontró un número mayor de mascarillas. Por lo que el estudio sugiere directamente que los sitios costeros visitados por bañistas presentan mayor índice de contaminación; esto podría minimizarse si la población tuviera conciencia ambiental, la cual se logra por medio de la educación. Estudios equivalentes realizados en otras zonas costeras del mundo, por ejemplo, Busher en el golfo Pérsico (Akhbarizadeh et al., 2021); Cox´s Bazar en Bangladés (Rakib et al., 2021) y Chile (Thiel et al., 2021), llegaron a resultados similares, lo que da cuenta de que ésta no es una situación aislada, sino generalizada. Por tal razón, la educación ambiental se presenta como una herramienta clave para promover conciencia, incluso en tiempos de pandemia. Ésta puede impartirse haciendo uso de la tecnología (Borja-Sánchez, 2024). El proyecto "Jóvenes aprendiendo a conservar" proporciona un ejemplo claro. Mediante una serie de webinars que contó con un promedio de 275 espectadores, logró contribuir a incrementar el interés de los asistentes en la conservación de la biodiversidad y la búsqueda de alternativas de solución a problemas ambientales (Pérez-Guadián y Dorantes-Molina, 2021).

Alternativas de solución

Los problemas ambientales antes mencionados, derivados del incremento en el uso de EPP durante la pandemia, hacen necesario buscar alternativas sostenibles que reduzcan el impacto ambiental.

Las investigaciones consultadas que se relacionan con alternativas de solución se mencionarán en dos grupos: el primero supone el uso de materiales biodegradables para la fabricación de mascarillas, con el fin de minimizar sus impactos ambientales cuando sean desechadas; y el segundo propone la biodegradación de las mascarillas convencionales, es decir, las elaboradas a partir de materia prima petroquímica, después de uso.

La celulosa bacteriana es un biopolímero considerado como uno de los materiales alternativos para remplazar los medios de filtración sintéticos utilizados en la producción de mascarillas N95, debido a que posee varias propiedades deseables: es biodegradable, tiene alta pureza, posee una estructura de malla de nanofibras de 20 a 100 nm y buena resistencia mecánica, alta capacidad de retención de agua y una alta eficiencia de filtración. La celulosa bacteriana es un biopolímero sintetizado extracelularmente por varios tipos de bacterias, entre ellos, *Gluconacetobacter, Acetobacter, Pseudomonas, Azotobacter, Sarcina ventriculi* y Salmonella. Las bacterias productoras de celulosa más importantes son *Gluconacetobacter hansenii, Gluconacetobacter xylinum y Gluconacetobacter pasteurianus* (Sharma et al., 2023).

La tabla 1 muestra una comparación entre las mascarillas N95 convencionales y las elaboradas con celulosa. Como puede observarse las características se mantienen e incluso se mejoran con el biopolímero.

Tabla 1.

Comparación entre mascarillas N95 y mascarillas de celulosa

Mascarilla N95	**Mascarilla de celulosa**
95% filtración	99.99% filtración
Filtra partículas de hasta 0.3 μm	Filtra partículas < 100 nm
Transpirable	Hidrofobicidad
Alta fuerza mecánica	Antibacteriana
Problemas de disposición final	Transpirable
	Alta fuerza mecánica
	Biodegradable
Gope et al., 2020	

También se ha propuesto el uso de ácido poliláctico (PLA) como candidato prometedor para producir mascarillas en lugar de los de origen fósil. En la investigación de Soo et al. (2022) se estudió la biodegradación de mascarillas desechables de tres capas elaboradas con PLA e inoculadas con lodos de depuración a temperatura ambiente, en diferentes condiciones de pH (2, 7 y 13), durante intervalos de tiempo regulares de hasta ocho semanas. El estudio demostró que, en condiciones de pH básico, en la primera semana se registró una pérdida de 25% de peso, aun cuando sólo la capa intermedia experimentaba una degradación considerable. Además, se constató que después de ocho semanas los fragmentos solubilizados de PLA fueron mineralizados completamente sin gene-

rar microplásticos. Este estudio es muy importante, ya que comprueba que el PLA puede ser metabolizado por los microorganismos presentes en los lodos sin generar compuestos contaminantes y mostrando un buen porcentaje de biodegradación en poco tiempo. Por tratarse de condiciones muy específicas, este método tendría que ser escalado a un biorreactor y probar mayores tiempos de incubación.

Podemos mencionar un ejemplo ya presente en el mercado con el nombre de Airx coffee mask (https://airxcoffee.jp/en/). Dicha mascarilla está hecha de una capa hilos de café y un filtro desarrollado con nanotecnología a partir de moléculas de plata y fibras café. Según lo que informan sus campañas publicitarias, estas mascarillas son antimicrobianas, lavables, reutilizables y biodegradables (Ha y Trinh, 2021).

Si bien es importante producir mascarillas con materiales biodegradables, aún estamos lejos de que puedan elaborarse en grandes cantidades como para cubrir la demanda actual, por lo que seguirán utilizándose mascarillas fabricadas a partir de plásticos fósiles por un tiempo considerable. Esto hace que se considere como una alternativa de solución la biodegradación de mascarillas por medio de organismos o microorganismos.

En 2024, Azuara-Domínguez et al. investigaron la biodegradación de cuatro mascarillas (KN95, bicapa, tricapa y de tela) empleando la larva *Galleria mellonella.* El experimento se llevó a cabo en un recipiente de plástico de 2 L (litros) con tapa y perforaciones, en el que se colocaron 18.86 ± 1.12 gramos de mascarilla y 100 larvas por tratamiento. Los investigadores reportaron un consumo de cubrebocas de alrededor de 18 gramos para cada tipo de cubrebocas en 10 días, sin encontrar diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos y una producción de entre 4 y 6 pupas. Esto confirmó la degradación casi total de los cubrebocas por medio de las larvas. En otro estudio, Knicker y Velasco-Molina (2022) registraron la degradación de 250 miligramos de trozos de mascarillas (10 x 10 mm) no pretratadas a lo largo de seis meses en un microcosmo a 25 °C con 20 gramos de suelo. Al respecto, reportaron una mineralización de 4 a 5% que, si bien no alteró la apariencia, generó CO2, lo que comprueba que los microorganismos presentes en el suelo realizaron una acción de degradación sobre las mascarillas.

De los dos estudios antes mencionados puede inferirse que los microorganismos cumplen un papel fundamental en la degradación, tanto los de la microbiota de las larvas (Azuara-Domínguez et al., 2024) como los alojados en el suelo utilizado (Knicker y Velasco-Molina, 2022). Esto se evidencia en la investigación de Ma et al. (2022), en la que se expusieron mascarillas en agua de mar durante 30 días para evaluar su envejecimiento. Se encontraron colonizadores microbianos como *Rhodobacteraceae Flavobacteriaceae y Vibrionaceae*, registrándose una disminución de 7% de peso de las fibras de las mascarillas. Este resultado respondió a la interacción de diferentes factores: radiación uv, oxígeno disuelto y la biopelícula formada por los microorganismos.

Asimismo, en 2022, Subekti y Wulandari probaron algunos microorganismos del intestino de la termita *Macrotermes gilvus* y, aunque no fueron identificados, la adición de las bacterias al proceso de compostaje de mascarillas obtuvo el mejor resultado basado en las propiedades físicas y químicas de la composta. Ese año también se aisló una bacteria *Staphylococcus* sp. de suelos agrícolas de Bhubaneswar, India, y se probó para la biodegradación de mascarillas a nivel de laboratorio, pero sólo se obtuvo 2% de pérdida de peso (Priyadarshini et al., 2024).

Estas investigaciones constituyen una pauta para continuar en esta línea, ya que se ha comprobado que las mascarillas pueden ser mineralizadas. Es importante aislar los microorganismos responsables de esta acción e identificar las enzimas involucradas, para poder escalar los procesos

y hacer frente a la cantidad de desechos que deben tratarse para mitigar sus impactos ambientales.

Consideramos que las alternativas deben involucrar dos segmentos con características específicas: el primero es el desarrollo de mascarillas elaboradas con materiales biodegradables, que paulatinamente vayan sustituyendo a las actuales; el segundo es diseñar, optimizar y escalar procesos biotecnológicos para degradar los desechos actuales.

Cabe señalar que estas alternativas sólo serán prósperas cuando los gobiernos regulen la disposición de los desechos. La buena gobernanza es considerada ya el nuevo pilar del desarrollo sostenible que, junto con los ejes social, ambiental y económico, integran el compromiso de una buena gestión de recursos (Quintero-Romero, 2023). En el caso específico de México, la gestión de desechos de residuos plásticos en general no está regulada. La NOM-161-Semarnat-2011 (dof, 1 de febrero de 2013) es la única norma que regula los desechos plásticos, pero se limita sólo a los grandes generadores, es decir, a los que generan cantidades mayores a 10 t anuales.

Conclusiones

A pesar de que la emergencia ocasionada por la pandemia de Covid-19 se declaró terminada, el uso de mascarillas no se eliminará por completo, lo que supone un panorama devastador para el medio ambiente. Los ecosistemas marinos, en especial la fauna, son los más afectados por los desechos plásticos de gran tamaño y los microplásticos, que pueden ser vectores de otro tipo de contaminantes.

Por ello resulta crucial la sinergia entre agencias médicas, científicos ambientales, líderes políticos y la comunidad en general, en aras de mejorar los sistemas de gestión de desechos y la administración de residuos. Se debe buscar la corrección de las malas prácticas de gestión, además de aumentar la conciencia.

Asimismo, es importante realizar esfuerzos en el sentido de alentar a las empresas a utilizar materiales biodegradables; una opción ecológica es la producción de mascarillas de pla o celulosa.

Futuras investigaciones deben orientarse a solucionar las limitaciones que hoy impiden una producción a gran escala y el desarrollo de materiales de mayor degradabilidad que se descompongan completamente y mantengan las propiedades de protección. Aunado a ello, deben buscarse microorganismos con capacidad para degradar las mascarillas convencionales hechas a base de plásticos fósiles.

Referencias

Akhbarizadeh, R., Dobaradaran, S., Nabipour, I., Tangestani, M., Abedi, D., Javanfekr, F. y Zendehboodi, A. (2021). Abandoned Covid-19 personal protective equipment along the Bushehr shores, the Persian Gulf: an emerging source of secondary microplastics in coastlines. *Marine pollution bulletin*, 168, 112386. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112386

Aragaw, T. A. (2020). Surgical face masks as a potential source for microplastic pollution in the COVID-19 scenario. *Marine pollution bulletin*, 159, 111517. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111517

Arellano-Varona, M., López-Velasco, R. y Rivera-Ramírez, J. (2023). Violencia escolar en el Centro de Estudios Tecnológicos, Industriales y de Servicios (cetis) N°116, Acapulco, Guerrero, México. *Revista Investigium IRE: Ciencias Sociales y Humanas*, 15(1), 57-74. doi: https://doi.org/10.15658/INVESTIGIUMIRE.241501.04

Azuara-Domínguez, A. A., Rodríguez, A. P., Alcántara, P. F. G., Lázaro-Dzul, M. O., Trujillo, Y. D., Madriz, H. V., y Ojeda, A. M. (2024). *Galleria mellonella y Tenebrio molitor* Biodegraders of Bags, Straws, Unicel Cups and Face Mask. *Tropical and Subtropical Agroecosystems,* 27(2). http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.5145

Ben Haddad, M. B., De-la-Torre, G. E., Abelouah, M. R., Hajji, S., y Alla, A. A. (2021). Personal protective equipment (ppe) pollution associated with the COVID-19 pandemic along the coastline of Agadir, Morocco. *Science of The Total Environment,* 798, 149282. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149282

Berthel, L. L., Benítez, L. T., Salgado, B. A., Espinosa, A. P., y Montero, L. V. (2022). Mascarillas faciales: contaminación ambiental, efectos toxicológicos, posibles soluciones y políticas globales. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*. https://doi.org/10.26507/paper.2438

Borja-Sánchez, J. (2024). Editorial: La educación ambiental como medio para alcanzar la ecociudadanía. *Revista Electrónica en Educación y Pedagogía,* 8(13), 9-14. https:// doi.org/10.15658/rev.electron.educ.pedagog24.02081401

Conahcyt (2023). Covid-19 México. https://datos.covid-19.conacyt.mx/

De la Torre, G. E., Apaza-Vargas, D. M., y Santillán, L. (2020). Microplastic ingestion and feeding ecology in three intertidal mollusk species from Lima, Peru. *Revista de Biología Marina y Oceanografía,* 55(2), 167-171. https://doi.org/10.22370/rbmo.2020.55.2.2502

Deutsche Welle (2020). Residuos de la pandemia se acumulan en México. https://www.dw.com/es/residuos-de-la-pandemia-se-acumulan-en-m%C3%A9xico/a-53490794

Di Renzo, L., Mascilongo, G., Berti, M., Bogdanović, T., Listeš, E., Brkljača, M. y Di Giacinto, F. (2021). Potential impact of microplastics and additives on the health status of loggerhead turtles (Caretta caretta) stranded along the Central Adriatic Coast. *Water, Air, & Soil Pollution,* 232, 1-20. https://doi.org/10.1007/s11270-021-04994-8

Digka, N., Tsangaris, C., Torre, M., Anastasopoulou, A., y Zeri, C. (2018). Microplastics in mussels and fish from the Northern Ionian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 135, 30-40. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.063

dof (2013, febrero 1). NOM-161-Semarnat-2011. Que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5286505&fecha=01/02/2013#gsc.tab=0

El Sol de Puebla (2024). México es uno de los países que más usa cubrebocas: encuesta. https://www.elsoldepuebla.com.mx/doble-via/salud/mexico-es-uno-de-los-paises-que-mas-usa-cubrebocas-encuesta-7895820.html

Goldstein, M. C., y Goodwin, D. S. (2013). Gooseneck barnacles (Lepas spp.) ingest microplastic debris in the North Pacific Subtropical Gyre. PeerJ, 1, e184. https://doi.org/10.7717/peerj.184

Gómez-Tagle, M. J., y Cilia-López, V. G. (2021). The massive misuse of face mask as a risk to COVID-19 pandemic in Latin American: the case of Mexico. *Research Square,* 10. https://orcid.org/0000-0003-0064-4490

Gope, D., Gope, A., y Gope, P. C. (2020). Mask material: challenges and virucidal properties as an effec-

tive solution against coronavirus sars-CoV-2. *Open Health,* 1(1), 37-50. https://doi.org/10.1515/open-he-2020-0004

Ha, T. M., y Trinh, V. D. (2021). Green brand equity and COVID-19 post-pandemic: The case of the world's first coffee face mask in Vietnam. The Future of Service Post-COVID-19 *Pandemic, Volume 2: Transformation of Services Marketing* (pp. 65-86). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4134-0_4

Kelly, H. (2011). The classical definition of a pandemic is not elusive. *Bulletin of the World Health Organization,* 89, 540-541. https://doi.org/10.2471/BLT.11.089086

Knicker, H., y Velasco-Molina, M. (2022). Biodegradability of disposable surgical face masks littered into soil systems during the COVID 19 pandemic—a first approach using microcosms. *Soil Systems,* 6(2), 39. https://doi.org/10.3390/soilsystems6020039

Li, B., Huang, Y., Guo, D., Liu, Y., Liu, Z., Han, J. C., y Xing, B. (2022). Environmental risks of disposable face masks during the pandemic of COVID-19: Challenges and management. *Science of the Total Environment,* 825, 153880. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.15388

Lin, V. S. (2016). Research highlights: impacts of microplastics on plankton. *Environmental Science: Processes & Impacts,* 18(2), 160-163. https://doi.org/10.1039/C6EM90004F

Ma, J., Chen, F., Xu, H., Liu, J., Chen, C. C., Zhang, Z., y Pan, K. (2022). Fate of face masks after being discarded into seawater: aging and microbial colonization. Journal of Hazardous *Materials,* 436, 129084. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129084

Merrill, G. B., Hermabessiere, L., Rochman, C. M., y Nowacek, D. P. (2023). Microplastics in marine mammal blubber, melon, & other tissues: Evidence of translocation. *Environmental Pollution*, 335, 122252. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122252

OceansAsia Foundation (2020). COVID-19 Facemasks & Marine Plastic Pollution. https://oceansasia.org/covid-19-facemasks/

OMS Organización Mundial de la Salud (2020a). Who Director-General's opening remarks at the media briefing on COVID-19 - 11 March 2020. https://www.who.int/director-general/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020

OMS Organización Mundial de la Salud (2020b). Modes of transmission of virus causing COVID-19: implications for ipc precaution recommendations. https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations

OMS Organización Mundial de la Salud (2020c). Shortage of personal protective equipment endangering health workers worldwide. https://www.who.int/news/item/03-03-2020-shortage-of-personal-protective-equipment-endangering-health-workers-worldwide

Pérez-Guadián, P. J., y Dorantes-Molina, J. F. (2021). ¿Cómo hacer educación ambiental en tiempos de COVID-19? Experiencias del proyecto "Jóvenes aprendiendo a conservar". *Educación ambiental y estudios biológicos. Aportes e investigaciones en tiempos de pandemia.* https://omp.siea.org.mx/omp/index.php/omp/catalog/view/7/151/219

Priyadarshini, B., Santhosh Kumar, M., y Das, A. P. (2024). Microbial Degradation of Synthetic Plastics Released from COVID-19 Generated Single Use Disposable Face Masks. En Das, A. P., y Mishra, S. (Eds.), Impact of COVID-19 Waste on *Environmental Pollution* and Its Sustainable Management: COVID-19 Waste and Its Management (pp.1-16). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50840-0_1

Quintero-Romero, D. (2023). Editorial: Educación ambiental y sustentabilidad. Elementos necesarios para el desarrollo. *Revista Electrónica en Educación y Pedagogía* 7(13), 9-13. https://doi.org/10.15658/rev.electron.educ.pedagog23.11081301

Rakib, M. R. J., De-la-Torre, G. E., Pizarro-Ortega, C. I., Dioses-Salinas, D. C., y Al-Nahian, S. (2021). Personal protective equipment (ppe) pollution driven by the COVID-19 pandemic in Cox's Bazar, the longest natural beach in the world. *Marine pollution bulletin*, 169, 112497. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112497

Santillán, L., Saldaña-Serrano, M., y De-La-Torre, G. E. (2020). First record of microplastics in the endangered marine otter (Lontra felina). *Mastozoología neotropical*, 27(1), 211-215. https://doi.org/10.31687/

saremMN.20.27.1.0.12
Sharma, P., Mittal, M., Yadav, A., y Aggarwal, N. K. (2023). Bacterial cellulose: nano-biomaterial for biodegradable face masks–a greener approach towards environment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management,* 19, 100759. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100759
Soo, X. Y. D., Wang, S., Yeo, C. C. J., Li, J., Ni, X. P., Jiang, L., y Loh, X. J. (2022). Polylactic acid face masks: Are these the sustainable solutions in times of COVID-19 pandemic? *Science of the Total Environment,* 807, 151084. nhttps://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151084
Subekti, N., y Wulandari, R. (2022). The Role of Bacteria in the Termites Intestine Macrotermes gilvus Hagen as a Biological Agent in the Degradation of Medical Mask Waste. Biosaintifika: *Journal of Biology & Biology Education,* 14(2). https://doi.org/10.15294/biosaintifika.v14i2.37711
Thiel, M., De Veer, D., Espinoza-Fuenzalida, N. L., Espinoza, C., Gallardo, C., Hinojosa, I. A., y Villablanca, R. (2021). COVID lessons from the global south–face masks invading tourist beaches and recommendations for the outdoor seasons. *Science of the Total Environment,* 786, 147486. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147486
Torres, F. G., Dioses-Salinas, D. C., Pizarro-Ortega, C. I., y De-la-Torre, G. E. (2021). Sorption of chemical contaminants on degradable and non-degradable microplastics: *Recent progress and research trends. Science of the Total Environment,* 757, 143875. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143875
Xie, M., y Chen, Q. (2020). Insight into 2019 novel coronavirus—An updated interim review and lessons from sars-CoV and mers-CoV. *International Journal of Infectious Diseases*, 94, 119-124. https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.03.071

Derechos de Autor© 2025 Narciso Ortiz, Leticia: Peña Montes, Carolina y Lizardi Jiménez, Manuel Alejandro



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Análisis de biopesticida con dosificación controlada de Bacillus thurin-giensis soportado en hidrotalcitas híbridas mediante inteligencia artificial

Aldara Natalya Moreno Torres[1*], Roberto Guerra González[2]
DOI: 10.56643/rcia.v4i1.201

Como citar este artículo: Moreno Torres, A.N., & Guerra González, R. (2025). Análisis de biopesticida con dosificación con-trolada de Bacillus thuringiensis soportado en hidrotalcitas híbridas mediante inteligencia artificial. *Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura*. 4(1). 19-26. DOI: https://doi.org/ 10.56643/rcia.v4i1.201

Resumen

Hoy en día sabemos que la dosificación controlada de moléculas es clave no sólo para optimi-zar procesos farmacológicos. Además, constituye una herramienta de gran potencial para su uso en la agricultura. En este trabajo estudiamos cómo los materiales inorgánicos, por ejemplo, los hidróxidos dobles laminares (HDL), tienen la capacidad de adsorber bacterias, aniones y metales pesados, entre otras sustancias, lo cual los hace ideales como soporte para un biopesticida basado en *Bacillus thuringiensis* (Bt). El objetivo principal fue analizar y mejorar la eficacia de este biopes-ticida utilizando tecnologías modernas. Empleando un modelo de inteligencia artificial basado en Random Forest, realizamos simulaciones para predecir las condiciones óptimas de dosificación y determinar las variables más influyentes en el proceso. Los resultados fueron claros, las con-centraciones resultaron ser el factor más crítico, mientras que el uso de como soporte tuvo un impacto significativo, representando 80% de importancia en la optimización.

Aunado a ello, el modelo mostró un alto nivel de precisión: alcanzó un error cuadrático medio (MSE) de 18.97 y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.87. Además de validar la efectividad del biopesticida, estos hallazgos demuestran la relevancia de integrar herramientas de inteligencia artificial en la investigación de materiales híbridos. Este enfoque mejora la agricultura sostenible y tiene el potencial de ser escalado para aplicaciones industriales, mostrando una diferencia en el diseño de soluciones innovadoras que utilizan estas herramientas, lo que marca un precedente para futuras investigaciones en optimización tecnológica aplicada.

Palabras clave: agricultura sostenible, aprendizaje automático, control biológico, optimización algorítmica, tecnologías limpias.

Abstract

Nowadays, controlled molecule dosage is not only essential for optimizing pharmacological processes but also a tool with great potential in agriculture. In this study, we explored how inor-ganic materials like layered double hydroxides (LDHs), known for their ability to adsorb bacteria, anions, and heavy metals, can be used as supports for a biopesticide based on *Bacillus thuringiensis* (Bt). The main goal was to analyze and improve the efficacy of this biopesticide using modern technologies. By applying a Random Forest-based artificial intelligence model, we simulated op-timal dosage conditions and identified the most critical variables in the process. The results were clear: concentrations stood out as the most influential factor, while using LDHs as a support had a significant impact, accounting for 80% importance in the optimization.

l Ingeniera Química, estudiante de la maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3512-8665. Correo de correspondencia: 1415842j@umich.mx
2 Profesor-Investigador en ciencias en Ingeniería Química y Ambiental, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. ORCID: https://orcid. org/0000-0001-7780-8858
Recibido: 06/12/2024| Aceptado: 21/02/2025 | Publicado: 15/06/2025
Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

Additionally, the model achieved high precision, with a mean squared error (MSE) of 18.97 and a coefficient of determination (R2) of 0.87. These findings not only validate the biopesticide's effectiveness but also highlight the importance of integrating artificial intelligence into hybrid material research. This approach enhances sustainable agriculture and opens the door to scaling these solutions for industrial applications, setting a foundation for future innovations in technological optimization.

Keywords: algorithmic optimization, biological control, clean technologies, *machine learning*.

Introducción

Durante el desarrollo de avances científicos, los sistemas de dosificación controlada han demostrado ser herramientas clave en el área farmacológica y en disciplinas como la ciencia de materiales, la biotecnología y la agricultura. Gracias a su capacidad para retener y liberar moléculas de forma precisa, estos sistemas permiten una distribución adecuada no sólo en cantidad, sino también en tiempo y localización, maximizando su eficiencia. Sin embargo, cuando la liberación no es óptima, pueden producirse concentraciones elevadas en sitios no deseados, con consecuencias como intoxicaciones (Sáez et al., 2002). Estudios recientes han mostrado que la incorporación de compuestos biológicamente activos en materiales con matrices inorgánicas puede optimizar sus propiedades, surgiendo así materiales híbridos con aplicaciones prometedoras (Fu et al., 2023).

Entre estos materiales destacan los hidróxidos dobles laminares (HDL). Éstos fueron descritos por primera vez por Miyata (1983), quien los caracterizó como estructuras tipo hidrotalcita con capacidad de intercambio iónico, lo que les permite adsorber diversas partículas. Dichas propiedades han fomentado su uso en áreas como la farmacéutica, la catálisis y la remediación ambiental (Park et al., 2007; Zhang et al., 2021). Dependiendo de las propiedades requeridas, por ejemplo, cristalinidad, tamaño de partículas o capacidad de intercambio iónico, los pueden sintetizarse empleando métodos como la coprecipitación, la hidrólisis de urea o la síntesis hidrotermal (Hsu et al., 2007; Vayssieres, 2009). Aunque su potencial en la remediación ambiental ha sido ampliamente estudiado, su aplicación en la agricultura como soporte para compuestos bioactivos sigue siendo limitada.

En el ámbito agrícola, *Bacillus thuringiensis* (Bt) ha sido utilizado como biopesticida desde la década de 1920, debido a su capacidad para producir δ-endotoxinas con propiedades insecticidas. Estas toxinas se activan en el tracto digestivo alcalino de los insectos, donde perforan el epitelio intestinal, causando la muerte de la plaga (Cardoso y Valim, 2006; Duraisamy et al., 2023). No obstante, su eficacia puede verse afectada por factores ambientales, lo que limita su efectividad en el control prolongado de plagas. Esto plantea la necesidad de desarrollar nuevas estrategias que permitan potenciar la acción de Bt y reducir su impacto ambiental. El uso de como soporte para la dosificación controlada de *Bacillus thuringiensis* representa una alternativa prometedora para abordar tales limitaciones. Inspirado por investigaciones sobre sostenibilidad agrícola (Castro Martínez y Fontalvo Buelvas, 2023), este trabajo propone aprovechar las capacidades de los para optimizar la retención y liberación controlada de Bt. Además, integra el uso de herramientas de inteligencia artificial, como el modelo Random Forest (Breiman, 2001), que permite identificar las condiciones óptimas de dosificación mediante el análisis de grandes volúmenes de datos y patrones complejos (Ho, 1995). El objetivo de este estudio es analizar y optimizar un biopesticida basado en *Bacillus thuringiensis* soportado en , utilizando inteligencia artificial para predecir las condiciones ideales de dosificación, a fin de contribuir a una gestión más eficiente y sostenible en el ámbito agrícola.

Metodología

Síntesis del material híbrido

Nuestra metodología se dividió en dos partes: la síntesis del material híbrido, combinando *Bacillus thuringiensis* (Bt) con hidróxidos dobles laminares (HDL), y la implementación de un modelo de inteligencia artificial para analizar y optimizar este material. Para efectuar la síntesis de , seleccionamos el método de coprecipitación de sales metálicas por su capacidad de obtener matrices inorgánicas altamente cristalinas (Fu et al., 2023). Este procedimiento consistió en la adición simultánea de soluciones de nitratos de magnesio y aluminio en una proporción molar específica, junto con una solución alcalina de hidróxido de potasio, manteniendo un pH constante de 9. La mezcla se agitó vigorosamente a 80 °C durante 18 horas para favorecer la homogeneización y el crecimiento uniforme de los cristales, lo que asegura propiedades óptimas del material, tal como lo mencionan Vayssieres (2009) y Zhang et al. (2021). Posteriormente, Bt se incorporó cuidadosamente a la matriz inorgánica mediante la suspensión de esporas y cristales en agua desionizada, ajustando la concentración para preservar su actividad biológica (Talkhan et al., 2023). La mezcla se sometió a agitación continua durante 24 horas a temperatura ambiente para asegurar una distribución uniforme dentro de la matriz , una condición respaldada por estudios recientes sobre interacciones de materiales biológicos con matrices inorgánicas (Duraisamy et al., 2023). Finalmente, se realizó la separación y secado del material. La centrifugación a velocidades de 3000 y 5000 rpm permitió separar los sólidos de la fase líquida. Luego, se lavó el precipitado con agua desionizada estéril para eliminar cualquier Bt no intercalado. El secado se llevó a cabo a temperaturas inferiores a 40 °C para evitar la desnaturalización de las proteínas activas y preservar la calidad del material, como sugieren Talkhan et al. (2023).

Tabla 1 Condiciones experimentales para la síntesis del material híbrido

Parámetro	**Condición**
Proporción molar Mg:Al	3:1 (mol/mol)
pH	8 (ajustado con hidróxido de potasio)
Temperatura	80 °C
Tiempo de agitación	18 horas
Velocidad de centrifugación	3000–5000 rpm
Secado	< 40 °C

Nota: Las condiciones fueron seleccionadas con base en estudios previos que optimizan la formación de y preservan la actividad biológica de *Bacillus thuringiensis* (Vayssieres, 2009; Zhang et al., 2021; Talkhan et al., 2023).

Diseño del modelo de inteligencia artificial

Para analizar y optimizar las propiedades del material híbrido, implementamos un modelo de Random Forest, reconocido por su capacidad de manejar datos complejos y patrones no lineales (Breiman, 2001). El modelo se entrenó utilizando datos experimentales relacionados con variables como la concentración de Bt, el pH, temperatura y tiempo de exposición. Primero dividimos los datos en conjuntos de entrenamiento y prueba, siguiendo prácticas estándar de aprendizaje automático (Pedregosa et al., 2011). El modelo fue desarrollado en Python utilizando Visual Studio

Code, con soporte de bibliotecas clave: Pandas para la manipulación de datos (McKinney y Reback, 2020), NumPy para cálculos matemáticos y estadísticos (Harris et al., 2020) y Scikit-learn para la implementación del modelo y su evaluación (Pedregosa et al., 2011). Las métricas utilizadas incluyeron el error cuadrático medio (mean_squared_error) y el coeficiente de determinación (r2_score), permitiendo cuantificar la precisión del modelo.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en este estudio validan la precisión del modelo de inteligencia artificial y la relevancia de las condiciones experimentales seleccionadas. Además, ofrecen una visión clara de las mejores condiciones para la dosificación de *Bacillus thuringiensis* (Bt) soportado en hidróxidos dobles laminares (HDL). Estas condiciones se basaron en literatura científica y manuales agrícolas, en los que se sugieren dosis de Bt de entre 0.5 y 2 kg/hectárea, dependiendo del cultivo y la plaga objetivo (epa, 1998).

La tabla 2 presenta datos experimentales clave para la predicción de la dosificación y eficacia del biopesticida. Las predicciones realizadas por el modelo Random Forest coinciden en gran medida con los datos observados, mostrando un error absoluto menor a 3% en la mayoría de los casos, como se detalla en la tabla 3.

Tabla 2

Datos experimentales para la predicción de dosificación

Concentración	pH	Temperatura	Tiempo de exposición	Predicción de eficacia
0.1	6.5	25	12	52.1
0.2	7.0	30	24	62.3
0.3	7.5	35	36	72.6

Tabla 3

Predicciones de eficacia para diferentes condiciones y dosificaciones

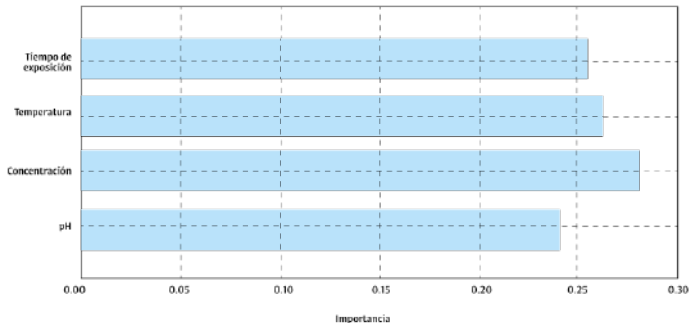
Condición	Dosificación de *Bt*	Eficacia observada (%)	Eficacia predicha (%)	Error absoluto (%)
Con HDL	Baja (50 mg/L)	80	78.5	1.5
Con HDL	Media (100 mg/L)	85	86.2	1.2
Con HDL	Alta (150 mg/L)	90	89.7	0.3
Sin HDL	Baja (50 mg/L)	60	58.0	2.0
Sin HDL	Media (100 mg/L)	65	66.5	1.5
Sin HDL	Alta (150 mg/L)	70	68.2	1.8

Importancia de las variables

La figura 1 muestra la importancia relativa de las variables (concentración, pH, temperatura y tiempo de exposición) según el modelo de Random Forest. La concentración de Bt destacó como la variable más relevante para optimizar la eficacia, seguida por el pH y la temperatura. Esto su-

braya la relevancia de ajustar cuidadosamente la concentración para maximizar el rendimiento del biopesticida.

Figura 1 *Importancia de las variables para la optimización de la dosificación obtenida en el modelo en Python*



La figura 1 fue obtenida del modelo de inteligencia artificial realizado con el código de Python y es la cuantificación de relevancia de la concentración, pH, temperatura y tiempo de exposición para optimizar el biopesticida. La comparación entre valores observados y predicciones, mostrada en la figura 2, revela la alta precisión del modelo, con un error cuadrático medio (mse) de 18.97 y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.87. El punto que se encuentra en la esquina superior derecha es el exacto (80.80). Por otra parte, en la distribución de los errores (o residuales) notamos que el modelo tiende a subestimar ligeramente las predicciones y, a pesar de que éstos no son números exagerados, son factores que deben considerarse. Al momento de evaluar el modelo se obtuvo un error cuadrático medio (mse) de 18.97 y un R^2 de 0.87, lo que sugiere que el modelo es efectivo y explica 87% de la variabilidad en los datos.

Figura 2
Comparación de valores reales vs predicción obtenidas en el modelo

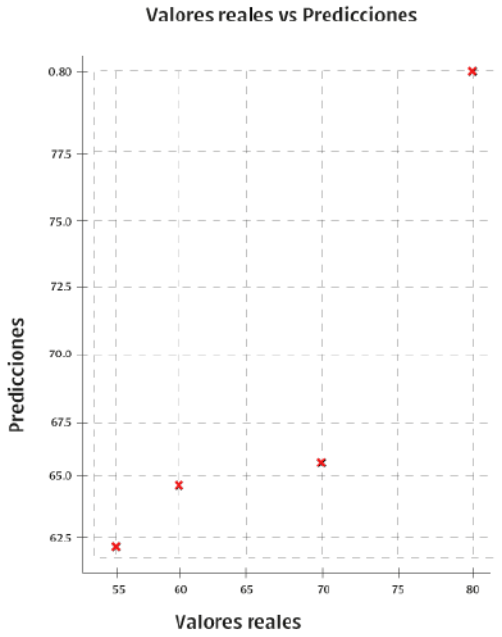
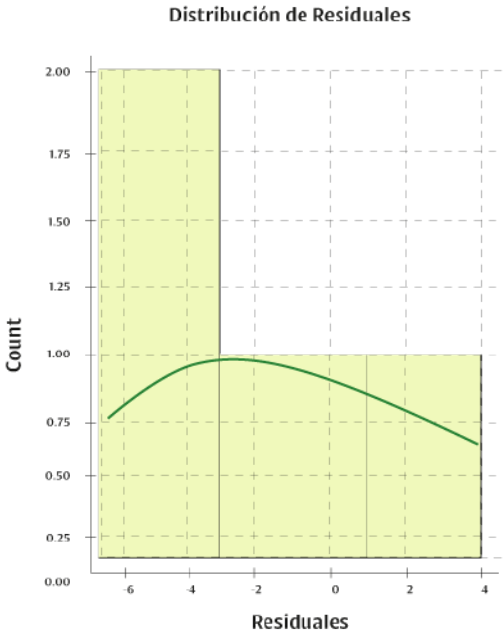


Figura 3
Distribución de residuales obtenidas en el modelo

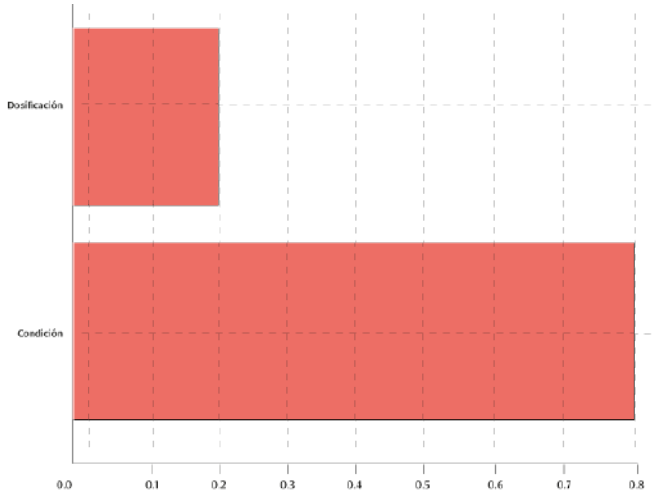


Eficiencia del soporte con HDL

La figura 4 muestra que el uso de como soporte para Bt representa 80% de la importancia en la optimización de la eficacia. Este resultado confirma que las hidrotalcitas no sólo actúan como soporte, sino que potencian significativamente la acción del biopesticida. Aunque las variables de dosificación, como el pH y la temperatura, aportan 18.7% a la eficacia, el soporte con sigue siendo el factor más influyente.

Figura 4

Comparación de importancia de las variables de dosificación y la condición de soporte para la eficiencia



En el futuro, vemos la posibilidad de aplicar estas técnicas de inteligencia artificial no sólo en biopesticidas, sino también en la dosificación de fertilizantes. Castillo López et al. (2024), por ejemplo, observaron que la correcta dosificación de fertilizantes químicos es crucial para mejorar el rendimiento de los cultivos, como en el caso del chile xkat iik. Se podría integrar herramientas de inteligencia artificial a estos procesos y optimizar aún más los resultados, reduciendo desperdicios y maximizando la eficiencia.

Conclusión

Con base en los resultados obtenidos, constatamos que, para sacar el máximo provecho de nuestro biopesticida, no basta con optimizar la cantidad de producto; también es necesario optimizar la forma en que se aplica. El modelo de Random Forest nos permitió identificar las condiciones óptimas de síntesis y dosificación, lo que mejoró tanto el proceso como los resultados. Además, nos ayudó a entender cuáles son los factores clave para maximizar la eficacia del biopesticida. El uso de hidróxidos dobles laminares como soporte para *Bacillus thuringiensis* incrementa su efectividad y reduce la dependencia de pesticidas químicos, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles.

Este trabajo no sólo demuestra la importancia de integrar herramientas tecnológicas como la inteligencia artificial a la investigación; además, abre una ventana a nuevas posibilidades. En el futuro, estas estrategias podrían extenderse a otros productos agronómicos, por ejemplo, fertilizantes, adaptándolos a distintas condiciones agrícolas y medioambientales. Además de beneficiar la productividad, esto refuerza nuestro compromiso con una agricultura más responsable y consciente.

Referencias

Askeland, D. R., y Fulay, P. P. (2017). Estructuras cristalinas de materiales. *En Ciencia e Ingeniería de los materiales* (6ª ed., pp. 60-86). Cengage Learning.

Benítez Aguilar, A., Velázquez Cigarroa, E., y Márquez Molina, O. (2023). Análisis de modelos de producción local para la sostenibilidad y seguridad alimentaria en el Estado de México. En Castro Martínez, O. R., y Fontalvo Buelvas, J. C. (Eds.), *Agricultura, huertos educativos y transformaciones socioecológicas: Experiencias significativas en México* (pp. 15-34). siea.

Bravo, A., Gill, S. S., y Soberón, M. (2007). Mode of action of *Bacillus thuringiensis* Cry and Cyt toxins and their potential for insect control. Toxicon, 49(4), 423-435. https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2006.11.022

Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Cardoso, L., y Valim, J. (2006). Study of acids herbicides removal by calcined Mg-Al-CO3-LDH. Journal of Physical Chemistry of Solids, 67, 987-993. https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2006.02.039

Caswell, T. A., Droettboom, M., Lee, A., Hunter, J., Firing, E., Nielsen, J., Elson, P., Seppänen, J. K., Dale, D., y Varoquaux, N. (2021). Matplotlib: Visualization with Python. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.4559847

Castillo López, E., Muñoz Osorio, G. A., López Tolentino, G., y Marín Colli, E. E. (2024). Evaluation of different doses of chemical fertilization on growth and yield of creole pepper "Xkat iik" *(Capsicum annuum L.)*. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 4(1). https://doi.org/10.5154/r.rchsat.2023.04.03

Chaara, D., Pavlovic, I., Bruna, F., Ulibarri, M., y Barriga, C. (2010). Removal of nitrophenol pesticides from aqueous solutions by layered double hydroxides and their calcined products. *Applied Clay Science*, 50, 292-298. https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.07.007

Duraisamy, K., et al. (2023). Development of a new broad-spectrum microencapsulation-based spray drying formulation of Bacillus thuringiensis. *Frontiers in Microbiology*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1273725

epa (Environmental Protection Agency). (1998). Reregistration Eligibility Decision (red) for Bacillus thuringiensis. Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substances.

Fu, Y., Fu, X., Song, W., Li, Y., Li, X., y Yan, L. (2023). Recent progress of layered double hydroxide-based materials in wastewater treatment. *Materials,* 16(16), 5723. https://doi.org/10.3390/ma16165723

Glare, T. R. (2000). *Bacillus thuringiensis: Biology, ecology, and safety.* Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4010-2

Harris, C. R., Millman, K. J., Van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., Van Kerkwijk, M. H., Brett, M., Haldane, A., Del Río, J. F., Wiebe, M., ... Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357-362. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2

Ho, T. K. (1995). Random Decision Forests. Proceedings of the 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition, 278-282. https://doi.org/10.1109/ICDAR.1995.598994

Miyata, S. (1983). Anion-exchange properties of hydrotalcite-like compounds. *Clays and Clay Minerals*, 31(4), 305-311. https://doi.org/10.1346/CCMN.1983.0310406

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: *Machine Learning* in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825-2830.

Talkhan, F. N., et al. (2023). Influence of some environmental conditions on stability and activity of *Bacillus thuringiensis* formulations. Egyptian Journal of Biological Pest Control. https://doi.org/10.1186/s41938-018-0064-x

Vayssieres, L. (2009). On the tailored assembly of nano-objects into integrated systems: A multiple scale approach. *Journal of Advanced Functional Materials,* 19(5), 688-697. https://doi.org/10.1002/adfm.200800968

Waskom, M. (2021). Seaborn: Statistical Data Visualization. *Journal of Open Source Software,* 6(60), 3021. https://doi.org/10.21105/joss.03021

Derechos de Autor© 2025 Moreno Torres, Aldara Natalya y Guerra González, Roberto



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Efecto del arbolado en la infraestructura urbana del boulevard 5 de mayo de la ciudad de Puebla, México

Luis Roberto Bonilla Toscano[1*], Gerardo Valdez Eleuterio[2]
DOI: 10.56643/rcia.v4i1.202

Como citar este artículo: Bonilla-Toscano, L.R., & Valdez-Eleuterio, G. (2025). Efecto del arbolado en la infraestructura ur-bana del boulevard 5 de mayo de la ciudad de Puebla, México. *Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura*. 4(1). 27-39. DOI: https://doi.org/ 10.56643/rcia.v4i1.202

Resumen

En la actualidad, las áreas verdes urbanas localizadas a lo largo de los camellones enfrentan una serie de problemas agravados por la selección de elementos arbóreos sin haber considerado las particularidades de cada especie ni las características ambientales y espaciales de cada vialidad. El objetivo de la presente investigación fue determinar la diversidad del arbolado presente en el camellón central del boulevard 5 de Mayo de la ciudad de Puebla y el impacto que ha producido en la infraestructura urbana. Para cada individuo arbóreo, se asentaron su nombre común, su nombre científico, el diámetro del tronco a la altura del pecho (dap), su estado fitosanitario y las afectaciones que ha provocado en la guarnición y el pavimento (longitud de las raíces expuestas). Se registraron 527 individuos pertenecientes a 15 especies botánicas, siendo Ficus benjamina la más abundante con 46.9% (abundancia relativa). Se constató que *Ficus elástica* y Jacaranda mimosifolia son las especies que ocasionan mayor afectación en la infraestructura urbana, presentando raíces expuestas que superan los 250 ± 50 cm de longitud promedio. Estos resultados resaltan la necesidad de realizar una planificación más cuidadosa en la selección y manejo de especies arbóreas para áreas urbanas, a fin de favorecer su adecuado desarrollo y mitigar su impacto en la infraestructura.

Palabras clave: Áreas verdes, Biodiversidad, Bosques urbanos, Fitoecología, Urbe

Abstract

Currently, the urban green areas found along the medians face a series of problems aggravated by the selection of tree elements without considering the particularities of each species, as well as the environmental and spatial characteristics of each road. The objective of this research was to determine the diversity of trees in the central median of 5 de mayo Boulevard in the city of Puebla and its impact on urban infrastructure.

For each tree individual, its common name, scientific name, trunk diameter at breast height (DBH), its phytosanitary status, as well as the effects on the trim and pavement (length of exposed roots) were recorded. 527 individuals belonging to 15 botanical species were recorded, with Ficus benjamina being the most abundant with 46.9% (relative abundance), Ficus elastica and Jacaranda mimosifolia are the species that generate the greatest impact on urban infrastructure with exposed roots exceeding 250±50 cm average length. These results highlight the need for more careful planning in the selection and management of tree species in urban areas to favor their adequate development and mitigate their impact on infrastructure.

Key words Green areas, Biodiversity, Urban forests, Phytoecology, Urban

1 M.Sc. en Biodiversidad y Conservación, Coordinación de Investigación, Universidad del Valle de Puebla. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5760-5873. Correo de correspon-dencia: coord.investigacion@uvp.mx
2 M.Sc. en Botánica, Coordinación de Investigación, Universidad del Valle de Puebla. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4566-7373
Recibido: 12/12/2024| Aceptado: 04/03/2025 | Publicado: 15/06/2025
Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

Introducción

Los bosques urbanos o áreas verdes proveen una serie de beneficios, contribuyendo a mitigar los efectos negativos de la acelerada urbanización. Estos espacios reducen el efecto de isla de calor y la contaminación atmosférica, favorecen la infiltración de agua de lluvia, reducen la escorrentía y las inundaciones, son un factor importante en el ahorro de energía eléctrica y generan sentimientos de bienestar en la población en tanto proporcionan un entorno para diversas actividades al aire libre (Bravo- Bello et al., 2020; Núñez, 2021: Macías-Muro et al., 2022; Martínez-Rodríguez y Cervantes- Nájera, 2023).

El desarrollo de infraestructura moderna ha llevado a que la iniciativa privada, los sectores público y privado, como también los programas gubernamentales, ejecuten proyectos viales en zonas estratégicas. En la actualidad, la adecuada planeación y gestión sustentable aseguran que los componentes ambientales, sociales, económicos, culturales y tradicionales mantengan un equilibrio. Uno aspecto que resulta de interés es, por ejemplo, la inversión en la infraestructura de parques naturales para mejorar la diversidad biológica (Macías-Moreno y Velázquez-Cigarroa, 2019)

Las áreas verdes públicas pueden diferenciarse en parques, plazas y jardines; unidades deportivas, bordos y canales, camellones, áreas naturales protegidas y azoteas verdes (Sudipto et al., 2012; Ko y Son, 2018). En una vialidad, sobre todo una que posea varios carriles, el camellón se construye para separar el tránsito de vehículos, ya sea en el mismo sentido o en sentidos opuestos (Gaytán-Díaz,2022).

De acuerdo con el *Manual de calles, diseño vial para ciudades mexicanas* (Desarrollo Territorial, 2019), los camellones se consideran un refugio peatonal al cruzar la calle. Generalmente están ubicados en el arroyo vial e impiden la circulación vehicular en sitios determinados. Además de ser espacios de resguardo y tránsito para peatones, sirven como zonas recreativas, áreas verdes, sitios con importancia estética o de recarga de agua pluvial.

Como parte de las áreas verdes de las zonas urbanizadas, los camellones desempeñan un papel fundamental en la calidad de vida de los habitantes, pues no sólo mejoran la percepción visual del paisaje y las condiciones ambientales, sino que también impactan significativamente en la infraestructura urbana.

Uno de los principales componentes de estos entornos es el arbolado urbano y su diversidad, el cual desempeña un papel fundamental pues ofrece una serie de servicios ecosistémicos que repercuten directamente en la calidad de vida de los residentes (Kardan et al., 2015). El rápido crecimiento de las ciudades ha hecho que la necesidad de dichos servicios ecosistémicos aumente de manera constante (Macías-Muro et al., 2022).

Estas áreas enfrentan una serie de problemas y complicaciones tanto heredados como recientes, los cuales se ven agravados por la selección de individuos arbóreos sin tener en cuenta elementos relevantes, entre ellos, las particularidades de cada una de las especies vegetales y su concordancia con las características espaciales de cada vialidad. Ello ha provocado un conflicto entre el desarrollo adecuado de los ejemplares biológicos y los espacios construidos (Castillo Rodríguez, 2015).

Actualmente, los problemas ambientales representan una de las mayores preocupaciones de la sociedad (González-López y López-Garay, 2024). Tales desafíos pueden percibirse desde diferentes ámbitos dentro de los asentamientos humanos, como sucede con la infraestructura vial (Gaytán-Díaz, 2022). Así, la adecuada planificación y gestión del arbolado urbano no sólo constituye un

elemento adicional dentro de la infraestructura de la ciudad, sino que también involucra una gran diversidad de factores que incluyen sus efectos en la salud pública, la conservación biológica y la mejora estética del entorno urbano (Gaspari y Senisterra, 2017); por lo tanto, una adecuada gestión y manejo del arbolado urbano es fundamental.

El boulevard 5 de Mayo es una de las principales vialidades de la ciudad de Puebla. Éste ha sido objeto de diversas intervenciones a lo largo del tiempo. El Gobierno del Estado de Puebla, a través del Instituto Municipal De Planeación municipal (Implan), realizó en 2018 el inventario del arbolado urbano de 11 vialidades dentro del municipio de Puebla, identificando un total de 6,928 individuos arbóreos pertenecientes a 54 especies. Los resultados obtenidos en el boulevard 5 de mayo reportaron un total de 1,115 árboles, siendo la jacaranda, los ficus y el fresno las especies más abundantes (De la Concha Duprat, 2018). La inadecuada selección de especies, sin considerar factores como el tamaño de las raíces, el crecimiento del tronco o las necesidades hídricas, puede generar efectos negativos en el entorno urbano, por ejemplo, la deformación de banquetas y guarniciones, el levantamiento del pavimento en las calles, la obstrucción o ruptura de tuberías subterráneas, de señalética y cableado, comprometiendo la seguridad y funcionalidad de los espacios urbanos.

El objetivo del presente estudio fue determinar la diversidad del arbolado presente en el camellón central del boulevard 5 de mayo de la ciudad de Puebla, como también el impacto que ha tenido en la infraestructura urbana.

Marco teórico

El acelerado crecimiento poblacional ha ejercido presión sobre los recursos naturales, convirtiéndose en uno de los principales retos para la planeación y el diseño urbano. Por ello se ha vuelto cada vez más importante encontrar un equilibrio sostenible entre las necesidades de los espacios construidos y el medio ambiente.

En este sentido, la expansión de los sistemas urbanos, incluyendo los agroindustriales, ha contribuido a la acelerada fragmentación de los ecosistemas naturales, provocando ciertos niveles de desequilibrio entre las zonas conservadas y los servicios ambientales que éstos proveen (Pascuas Rengifo et al., 2022).

El desarrollo urbano sostenible pretende integrar aspectos sociales, económicos, culturales y ambientales, componentes fundamentales para asegurar la funcionalidad de estos espacios.

Si bien los beneficios que trae consigo el arbolado urbano son ampliamente reconocidos, se has identificado ciertos efectos negativos, entre los que puede mencionarse el costo que implica su establecimiento y mantenimiento, tanto en lo que refiere a los árboles como a los daños físicos que éstos producen en la infraestructura urbana; a ello se suma la generación de sustancias volátiles, semillas y frutos con cierto grado de toxicidad, aparición de plagas y patógenos, además del polen que puede provocar alergias de tipo cutáneo o respiratorio (Esquivel y Quijas, 2021).

Las raíces son la parte inferior del eje de la planta; pueden estar enterradas en el suelo, desarrollarse en el aire o dentro del agua. Estas estructuras son esenciales para mantener y hacer crecer el árbol. Su función primordial es la absorción de agua y nutrientes, al tiempo que proporcionan soporte físico, respiran y almacenan nutrientes; para ello, exploran el suelo continuamente, de manera de encontrar estos recursos, por lo que su crecimiento se da tanto de manera longitudinal como en grosor.

Las raíces laterales de la mayoría de los árboles se encuentran a una profundidad de entre 50 y 100 centímetros (Secretaría de Desarrollo Urbano y Sustentabilidad, 2021). Esto da lugar a un conflicto entre el arbolado urbano y la infraestructura, resultado principalmente de una mala planificación al momento de elegir el espacio donde se ubicará cada árbol y de una mala selección de la especie, desconociendo sus requerimientos biológicos (Fernández y Vargas, 2011).

Un estudio realizado por Gaytán Díaz et al., (2021), en el que se analizaron los daños ocasionados a la infraestructura urbana por la posición del arbolado en el camellón de una de las principales vías de comunicación de la ciudad de Colima, registró la presencia de 135 árboles de 13 especies a lo largo de nueve tramos. Los resultados de este estudio demostraron que 81% de los ejemplares estaba mal posicionado o pertenecía a especies atípicas para la zona, las cuales generaron daño en guarniciones y pavimentos.

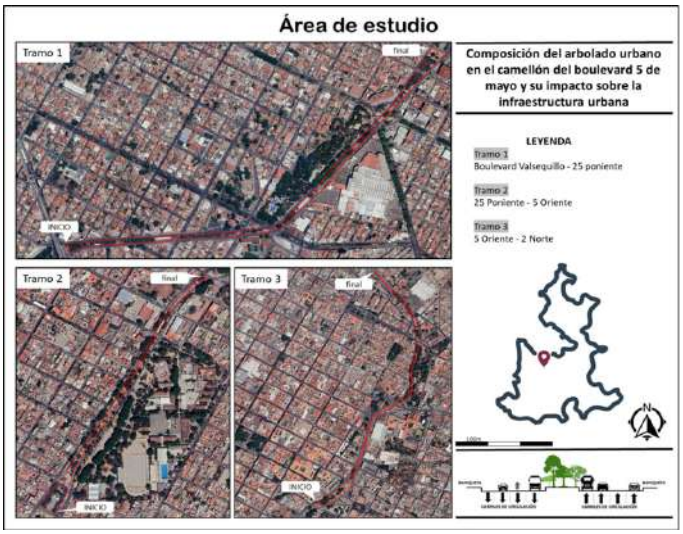
Posteriormente, Esquivel y Quijas (2021) realizaron un estudio dirigido a examinar cómo la inadecuada posición de los árboles causa daño significativo en la infraestructura, destacando el pavimento de las áreas verdes urbanas de Puerto Vallarta, Jalisco. Su muestreo les permitió contabilizar un total de 1,228 individuos arbóreos, de los cuales sólo 15% (170 ejemplares) mostraba algún daño visible, principalmente en el pavimento. Las especies *Delonyx regia, E. cyclocarpum, F. benjamina, F. insipida, R. donnell smithii y S. glauca* fueron las que más frecuentemente provocaron algún grado de afectación, debido a que poseen raíces de amplia extensión cuyo crecimiento es agresivo.

Tener en cuenta estos aspectos resulta crucial a la hora de diseñar una adecuada planificación urbana, que debe integrar tanto la funcionalidad del entorno construido como la presencia del arbolado.

Materiales y métodos
Área de estudio

El estudio se realizó en el municipio de Puebla, en el camellón central del boulevard 5 de mayo, a lo largo de 4.5 kilómetros aproximadamente. Para la toma de datos, el sitio se segmentó en tres tramos: el primero desde el boulevard Valsequillo hasta la calle 25 Poniente; el segundo desde la calle 25 Poniente a la calle 5 Oriente y, el último, desde la calle 5 Oriente a la calle 2 Norte (figura 1).

Figura 1.*Ubicación de los tres tramos en los que se realizó la toma de datos a lo largo del boulevard 5 de Mayo.*



El estudio fue de tipo cuantitativo descriptivo y su objetivo se orientó a determinar la riqueza de especies arbóreas dentro del área determinada y a cuantificar el daño causado por el tamaño y la ubicación de cada individuo, categorizando las afectaciones observadas en campo.

Se generó un instrumento en forma de tabla en el cual se recabó la información de cada árbol. En éste se registró: el número de árbol, su nombre común, su nombre científico, el diámetro del tronco a la altura del pecho (dap), las afectaciones a la guarnición y el pavimento, así como su estado fitosanitario. Al mismo tiempo se realizó el levantamiento fotográfico de cada árbol y de los daños detectados a su alrededor. El análisis de los datos se realizó por medio del paquete estadístico prism. GraphPad Software, Inc. Versión 8. 0. 2 (263).

El índice de Shannon-Wiener considera no sólo el número de especies sino su representación (cuántos individuos por especie). Este índice requiere que todas las especies estén representadas en la muestra y es muy susceptible a la abundancia (Magurran, 1988). Sin embargo, su principal limitante es que no contempla la distribución de las especies en el espacio (Soler et al., 2012).

El índice de Shannon-Wiener (H) procede de la teoría de la información y mide la diversidad como:

$$H' = \sum_{i=1}^{s} (p_i)(\ln p_i)$$

Donde

- H ′: es el índice de diversidad de Shannon.
- S: es el número total de especies.
- *pi* es la proporción de individuos de la especie
- ln es el logaritmo natural.

En la mayoría de los ecosistemas naturales este índice varía entre 0.5 y 5, aunque su valor normal está entre 2 y 3; valores inferiores a 2 se consideran bajos en diversidad y superiores a 3 son altos en diversidad de especies. El impacto detectado en la infraestructura urbana se caracterizó a partir del daño visible alrededor del individuo arbóreo, considerando específicamente los daños observados en las banquetas y el pavimento ocasionados por el crecimiento de raíces expuestas y su longitud (tabla 1). Finalmente, se determinó el nivel de daño causado por cada una de las especies identificadas como consecuencia de la longitud de sus raíces y el impacto detectado en la infraestructura a su alrededor.

Tabla 1 Categorización de los daños observados en la infraestructura vial (modificado de Esquivel y Quijas 2021)

Nivel de daño	Valor	Descripción
Sin daño	0	Ejemplar que no ha causado daño a la infraestructura; sin embargo, el crecimiento de sus raíces representa un potencial riesgo de afectación
Poco daño	1	Ejemplar que ha provocado grietas leves en la infraestructura.
Daño moderado	2	Ejemplar que ha provocado grietas considerables y levantamientos ligeros en la infraestructura, aunque no afectan su funcionalidad.
Daño severo	3	Ejemplar que ha provocado grietas y levantamientos severos que impiden la correcta funcionalidad de la infraestructura urbana.

Es importante destacar que las raíces de ciertos árboles, específicamente aquellos de gran crecimiento, pueden generar un impacto significativo en el entorno urbano, ocasionando daños a elementos como, banquetas, guarniciones y calzadas de circulación vehicular, dificultando el tránsito, incrementando el riesgo de accidentes y reduciendo la accesibilidad.

Resultados

Se registró un total de 527 árboles pertenecientes a 12 familias, 13 géneros y 14 especies. Las familias con mayor número de especies representadas fueron Oleaceae, Cupressaceae y Moraceae, con dos cada una; el resto con una sola especie. La especie más abundante fue Ficus benjamina con 245 individuos. En cuanto a su origen, 31.6% son especies nativas y 68.4% está representado por especies introducidas (tabla 2).

Tabla 2 *Relación de las familias y especies registradas en el censo.*

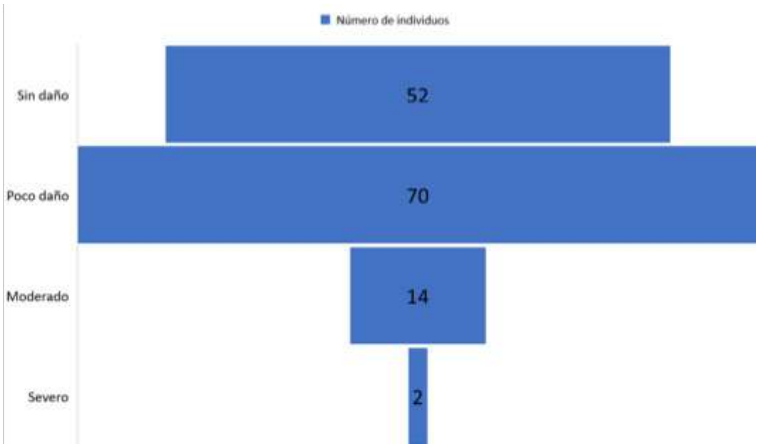
Familia	Especie	Nombre común	Nativo	Introducido
Fabaceae	*Erythrina coralloides*	Colorín	X	
Cupressaceae	*Cupressus sempervirens*	Ciprés		X
	Hesperocyparis arizonica	Cedro Blanco	X	
Fagaceae	*Quercus sp*	Cedro	X	
Myrtaceae	*Eucaluiptus globulus*	Eucalipto azul		X
Oleaceae	*Fraxinus uhdei*	Fresno mexicano	X	
	Ligustrum lucidum	Trueno		X
Moraceae	*Ficus benjamina*	Laurel de la India		X
	Ficus elastica	Hule		X

Bignoniaceae	*Jacaranda mimosifolia*	Jacaranda		X
Loranthaceae	*Psittacanthus schiedeanus*	Flor de palo	X	
Anacardiaceae	*Schinus molle*	Pirul		X
Salicaceae	*Salix babylonica*	Sauce		X
Arecaceae	*Phoenix canariensis*	Palma		X
Asparagaceae	*Yucca filifera*	Palma pita	X	

En cuanto al valor calculado para Shannon, la diversidad del sitio alcanzó un valor de 1.39, lo que se considera dentro del rango correspondiente a una diversidad baja.

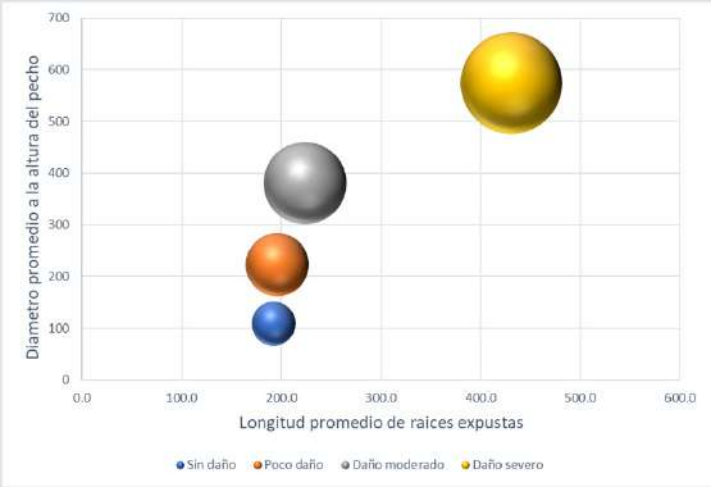
Se registraron 138 individuos arbóreos que presentan raíces expuestas, de los cuales 37.7% no ha provocado daño en la infraestructura, 50.7% ha causado poco daño, 10.1% daño moderado y sólo 1.4% produjo daños severos en la infraestructura urbana que los rodea (figura 2).

Figura 2. *Daños observados de acuerdo con la categorización propuesta.*



Conforme los datos obtenidos, se pudo determinar que el dap se relaciona proporcionalmente con la longitud de las raíces expuestas y al daño ocasionado por las mismas alrededor del individuo (figura 3).

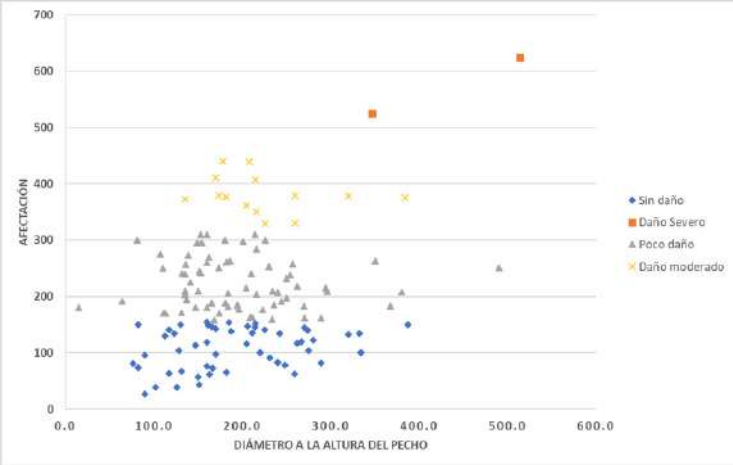
Figura 3 *Análisis de dispersión de los promedios por categoría de afectación propuesta. Se considera el dap y la longitud de las raíces expuestas, las cuales generan afectaciones alrededor de los árboles.*



En la siguiente gráfica se puede observar cómo se forman cuatro grupos de escalamiento definidos por las variables mencionadas, donde el mayor nivel de daño fue generado por los individuos con un diámetro de tronco más grande (figura 4).

Figura 4

Análisis de escalamiento multidimensional para los individuos que presentan raíces expuestas y el nivel de daño que han generado a su alrededor.



De acuerdo con el número total de árboles con raíces expuestas por cada una de las especies registradas, se puede determinar que Ficus benjamina y Jacaranda mimosifolia son las especies que más afectan la infraestructura, representando 38% y 21% de los casos, respectivamente (figura 5).

Figura 5

Imágenes de algunos de los individuos de *Ficus benjamina* (inferior) y *Jacaranda mimosifolia* (superior) que han generado daño a la infraestructura urbana.



En el caso particular de Ficus elastica, dos de los registros han ocasionado daños severos en la infraestructura, lo que se relaciona con su dap y la longitud de sus raíces expuestas, siendo los individuos que presentan los registros más elevados.

El análisis realizado revela que las raíces expuestas de estas especies pueden alcanzar más de 250 ± 50 cm y, en el caso de *Ficus elástica,* pueden superar los 550 ± 50 cm (figura 6). El crecimiento agresivo del sistema radicular de estas especies provoca levantamientos y agrietamientos que deterioran la infraestructura y su funcionalidad, además de representar un riesgo para la seguridad de los peatones y vehículos en tanto comprometen la integridad de las vialidades y generan costos adicionales de mantenimiento y reparación.

La tabla 3 presenta algunas especies arbóreas responsables de afectaciones en zonas urbanas determinadas en otros sitios.

Figura 6

Imágenes de individuos de Ficus elastica, uno de los ejemplares que producen daño severo en la infraestructura.



Tabla 3

Especies de árboles citados en otros estudios en zonas tropicales sobre daño a la infraestructura causado por árboles

Especie	Presente estudio	Esquivel, y Quijas, 2021.	Vargas, 2010	Román Guillén et al., 2019	Acosta, 2013	Benavides et al., 2004
Enterolobium cyclocarpum		X			X	
Ficus benjamina	*X*	X	X	X	X	
Terminalia catappa		X				
Artocarpus altilis			X			
Delonix regia		X	X	X	X	
Ficus insipida		X				
Ficus laphatifolia		X				
Ficus elastica	*X*		X	X	X	X
Spathodea campanulata		X	X	X		
Dypsis lutescens		X			X	
Jacaranda mimosifolia	X					

Conclusiones

El índice de diversidad de Shannon-Wiener refleja una baja variedad en el arbolado, en el que predominan especies introducidas con raíces invasivas; esto representa un problema, ya que las especies endémicas o locales han sido desplazadas.

Por otra parte, la mayoría de los individuos presentan valores altos de dap, lo cual puede indicar que se trata de árboles viejos que pueden dar lugar a otro tipo de riesgos, como caída de ramas y obstrucción visual.

El municipio de Puebla cuenta con un plan de desarrollo que considera la implementación de acciones, como actualizar los lineamientos ambientales municipales en materia de poda, derribo, trasplante y restitución de árboles; garantizar el mantenimiento de la vegetación de los camellones, glorietas y rotondas, integrar una red de dictaminadores y arboristas certificados para garantizar el correcto manejo y ampliar la cobertura arbórea en los espacios públicos y las vialidades con especies permitidas. Sin embargo, estas acciones no se aplican en su totalidad a sitios como el boulevard 5 de mayo, siendo implementadas sobre todo en remodelaciones o en nuevas obras públicas.

Los resultados destacan la necesidad de realizar una selección más cuidadosa de las especies arbóreas para este tipo se sitios. Para contribuir a la conformación de un entorno urbano más seguro y sostenible, es necesario tener en cuenta no sólo los beneficios estéticos, sino también su potencial impacto en la infraestructura, considerando su comportamiento radicular y su compatibilidad con las características del entorno construido.

Referencias

Acosta H., C. F. (2013). Especies no aptas y con manejo especial para la arborización urbana de Montería, Colombia. Revista Nodo, 15(8), 65-76. http://revistas.uan.edu.co/index.php/nodo/article/view/95/76

Benavides, M. H., López, R. M., y Flores, J. H. (2004). Daños a banquetas por arbolado de alineación establecido en cepas en la Delegación Coyoacán, Distrito Federal. Revista de Ciencias Forestales, 27(92), 53-77. http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/902

Bravo-Bello, J. C., Martínez-Trinidad, T., Valdez-Lazalde, J. R., Romero- Sánchez, M. E., y Martínez-Trinidad, S. (2020). Analyzing Potential Tree- Planting Sites and Tree Coverage in Mexico City Using Satellite Imagery. Forests, 11(4), 423. https://doi.org/10.3390/f11040423

Castillo Rodríguez, L., y Ferro Cisneros, S. (2015). La problemática del diseño con árboles en vías urbanas: "verde con pespuntes negros". Arquitectura y Urbanismo, XXXVI (1), 5-24. https://rau.cujae.edu.cu/index.php/revistaau/article/view/322

Desarrollo Territorial (2019). Manual de calles: Diseño vial para ciudades mexicanas. Manual de calles. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/509173/Manual_de_calles_2019.pdf

De la Concha, D. H. (2018). Inventario del arbolado urbano en vialidades principales del municipio de Puebla. Instituto Municipal De Planeación de Puebla. https://www.itreetools.org/documents/487/190409_Vialidades_Puebla_Rev_4.11_reduced_file_size.pdf

Esquivel, T. y Quijas, S. (2021). Daño a la infraestructura (pavimento) causado por el arbolado urbano en Puerto Vallarta, Jalisco. Revista mexicana de ciencias forestales, 12(68), 178-201. https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i68.1166

Fernández, M. P., y Vargas, A. (2011). La ciudad y los árboles: Conflicto entre el arbolado y la infraestructura urbana. Agronomía y Forestal, (43). https://agronomia.uc.cl/component/com_sobipro/Itemid,232/fid,218.652/sid,87/task,download.file/

Gaytán Díaz, E. E., Correa Fuentes, D. A., Arceo Díaz, S., Moreno Peña, J. R., y Galeana Pérez, Á. E. (2021). Importancia del adecuado posicionamiento del arbolado dentro de los camellones para evitar daños en infraestructura: Caso av. San Fernando. Innovación y Desarrollo Tecnológico Revista Digital, 13(3), 735. https://iydt.wordpress.com/wp-content/uploads/2021/08/3-09_importancia-del-adecuado-posicionamiento-del-arbolado-dentro-de-los-camellones-para-evitar-danos-en-infraestructura.pdf

Gaytán Díaz, E. E. (2022). Evaluación de los camellones mediante los criterios técnicos urbano-ambientales de la ciudad de Colima. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Colima, División de Estudios de Posgrado. https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/5652/1/tesis.pdf

Gaspari, J., y Senisterra, E. (2017). Funciones y pautas de convivencia con el arbolado urbano en dunas costeras, Argentina. Revista de Tecnología. Journal of Technology, 16(2), 9-17. https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/118502

Gobierno del Estado de Puebla (2022). Plan Municipal de Desarrollo de Puebla, Puebla, 2021-2024. Secretaría de Gobernación. Orden Jurídico Poblano. https://ojp.puebla.gob.mx/normatividad-municipal/item/3778-plan-municipal-de-desarrollo-de-puebla-puebla-2021-2024

González-López, J. y López-Garay, H. (2024). Concepciones de "naturaleza" en estudiantes universitarios: Implicaciones para la educación ambiental. *Revista Electrónica en Educación y Pedagogía,* 8(14), 70-83. https://doi.org/10.15658/rev.electron.educ.pedagog24.02081405

Kardan, O., Gozdyra, P., Misic, B., Moola, F., Palmer, L. J., Paus, T., y Berman, M. G. (2015). Espacios verdes vecinales y salud en un gran centro urbano. Sci. Rep. 5, 11610. https://www.*nature*.com/articles/srep11610

Ko, H., y Son, Y. (2018). Perceptions of cultural ecosystem services in urban green spaces: A case study in Gwacheon, Republic of Korea", Ecological Indicators, 91, 299-306. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X18302528

Macías-Moreno, L. F. y Velázquez, Cigarroa, E. (2019). Sistematización de la participación de comunidades étnicas en la restauración forestal del pacifico colombiano. En L. A, Sánchez Midence, E. Velázquez Cigarroa, L. Victorino-Ramírez, O. R. Castro Martínez y E. Tello- García (Eds.), Sostenibilidad y presente. Desafíos y aciertos en la construcción del futuro (pp. 202-215). 1a. ed. Universidad Autónoma Chapingo.

https://omp.siea.org.mx/omp/index.php/omp/catalog/view/3/56/101
Macías-Muro, A., Martínez-Trinidad, T., Valdez-Lazalde, J. R., Romero-Sánchez, M. E., y Vaquera-Huerta, H. (2022). Evaluación de la salud del arbolado urbano a través de imágenes satelitales en Guadalajara, México. Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento, 10(24). https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2022.24.81200
Magurran, A. E. (1988). Ecological diversity and its measurement. Princeton University Press. 179 pp. https://doi.org/10.1007/978-94-015-7358-0
Martínez-Rodríguez, M., y Cervantes-Nájera, A. (2023). La conexión de las personas con las áreas verdes urbanas. Una revisión de la literatura. *Revista Investigium IRE: Ciencias Sociales y Humanas*, XIV(1), 52-62. https://doi.org/10.15658/INVESTIGIUMIRE.231401.0
Núñez, J. M. (2021). Análisis espacial de las áreas verdes urbanas de la Ciudad de México. Economía, sociedad y territorio, 21(67), 803-833. https://doi.org/10.22136/est20211661
Pascuas Rengifo, E., Basto Monsalve, M. B., y Fontalvo Buelvas, J. C. (2022). Methodological proposal to manage ecosystem resilience of natural protected areas in Colombia. Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical, 2(1), 77-91. http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsat.2022.03.06
Roman, L. A., Conway, T. M., Eisenman, T. S., Koeser, A. K., Ordóñez B., C., Locke, D. H., Jenerettem, G. D., Ostberg, J., y Vogt, J. (2021). Beyond, trees are good: Disservices, management costs, and tradeoffs in urban forestry. Ambio 50(3): 615-630. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7882647/
Secretaría de Desarrollo Urbano y Sustentabilidad (2021). Inventario Municipal de Áreas Verdes. Puebla. Recuperado de: https://datosabiertos.pueblacapital.gob.mx/dataset/inventariomunicipal-de-%C3%A1reas-verdes
Soler, P. E., Berroterán, J. L., Gil, J. L., y Acosta, R. A. (2012). Índice valor de importancia, diversidad y similaridad florística de especies leñosas en tres ecosistemas de los llanos centrales de Venezuela. Agronomía Tropical, 62(1-4). https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2012000100003
Sudipto, R., Byrne, J., y Pickering, C. (2012). A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones, Urban Forestry & Urban Greening, 11 (4), 351-363. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.06.006
Vargas-Garzón, B. y Molina-Prieto, L. F. (2010). Cinco árboles urbanos que causan daños severos en las ciudades. Facultad de Artes Universidad Antonio Nariño. Revista Nodo, 9(5), 115-126. http://revistas.uan.edu.co/index.php/nodo/article/view/43/35

Derechos de Autor© 2025 Bonilla Toscano, Luis Roberto y Valdez Eleuterio, Gerardo



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Potencial de la Espirulina (Arthrospira spp. Y Spirulina spp.) en la Producción de Biocombustibles: Una Revisión de Técnicas y Avances.

Ariadne Coronado Tovar[1*], Sonia Herrera Monroy[2], Pablo Antonio López Pérez[3]

DOI: 10.56643/rcia.v4i1.204

Como citar este artículo: Coronado Tovar, A., Herrera Monroy, S., & López Pérez, P. A. (2025). Potencial de la espirulina (Arthrospira spp. y Spirulina spp.) en la producción de biocombustibles: una revisión de técnicas y avances. *Revista Científica de Ingenierías y Arqui-tectura*. 4(1). 40-58. DOI: https://doi.org/ 10.56643/rcia.v4i1.204

Resumen

Las cianobacterias son un grupo diverso de microorganismos fotosintéticos que destacan por su capacidad de adaptarse a diferentes condiciones ambientales y por la producción de compues-tos biotecnológicos de alto valor. Entre estas, la Espirulina (Arthrospira spp. y Spirulina spp.) ha captado la atención de la industria debido a su potencial como materia prima para biocombusti-bles de nueva generación. Su uso se basa en la alta productividad de biomasa y su capacidad para acumular lípidos, propiedades esenciales en la producción de biodiesel. Este trabajo aborda una revisión exhaustiva de las técnicas de edición genética aplicadas a microalgas, identificando los métodos más efectivos, como la biobalística, electroporación, transformación mediada por *Agro-bacterium*, conjugación y transformación de protoplastos. Estas metodologías permiten la manipu-lación precisa del ADN de estos organismos, mejorando características como la resistencia a con-diciones adversas y la acumulación de metabolitos de interés. En conclusión, los avances recientes destacan la relevancia de marcadores metabólicos y sistemas basados en resistencia a antibióticos como herramientas clave en la optimización de Espirulina para aplicaciones industriales.

Palabras clave: Algas, biocombustibles, Espirulina, genética, industria.

Abstract

Cyanobacteria are a diverse group of photosynthetic microorganisms that stand out for their ability to adapt to different environmental conditions and for the production of high-value biotechnological compounds. Among these, Spirulina (Arthrospira spp. and Spirulina spp.) has captured the attention of the industry due to its potential as a raw material for new generation biofuels. Its use is based on its high biomass productivity and its capacity to accumulate lipids, essential properties in biodiesel production. This work addresses an exhaustive review of gene editing techniques applied to microalgae, identifying the most effective methods, such as bioballistics, electroporation, *Agrobacterium*-mediated transformation, conjugation and protoplast transformation.

[1]Estudiante de Ingeniería en Biociencias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, escuela Superior de Apan. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5446-7373. Correo de correspondencia: ariadne08coro@gmail.com
[2]Doctora en Ciencias en Horticultura, Profesor en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior de Apan. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0275-2831.
[3]Doctor en Biotecnología, Profesor en la Universidad Autónoma del Estado deHidalgo, Escuela Superior de Apan. ORCID: https://orcid.org/00001-7534-2142.
Recibido:09/12/2024 |Aceptado:20/03/2025| Publicado:15/06/2025
Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

These methodologies allow the precise manipulation of the DNA of these organisms, improving characteristics such as resistance to adverse conditions and the accumulation of metabolites of interest. In conclusion, recent advances highlight the relevance of metabolic markers and antibiotic resistance-based systems as key tools in the optimization of Spirulina for industrial applications.

Key words: Algae, biofuels, genetics, industry, Spirulina

Introducción

El mundo enfrenta dos grandes problemas energéticos: el agotamiento de las reservas petroleras y la contaminación causada por los combustibles fósiles (Castells, 2012). Durante décadas, el petróleo ha sido la principal fuente de energía, pero su explotación implica graves impactos ambientales (Fernández-Linares et al., 2012). Ante esto, los biocombustibles, como el biodiesel, han emergido como alternativas sostenibles.

Las microalgas, incluidas las del género Spirulina, son particularmente atractivas debido a su eficiencia fotosintética, alta capacidad de asimilación de CO2 y su potencial para acumular triglicéridos (Demirbas y Demirbas, 2010).

La producción de biodiesel a partir de microalgas representa una alternativa prometedora para resolver estos problemas. Las microalgas destacan por su capacidad para crecer en medios no aptos para la agricultura tradicional y su alta tasa de conversión de dióxido de carbono en biomasa rica en lípidos. En este contexto, el género Spirulina, en particular, ha mostrado características únicas que la hacen adecuada para este propósito. Entre estas características se encuentran su rápida tasa de crecimiento, alta concentración de proteínas y lípidos, y su capacidad para prosperar en condiciones extremas.

La producción de biodiesel a partir de microalgas ha sido objeto de investigación durante más de 20 años y, en la última década, ha cobrado gran relevancia. Actualmente, científicos de diversas partes del mundo han demostrado el potencial de varias especies de microalgas, como Chlorella minutissima, Thalassiosira fluviatilis y Thalassiosira pseudomona como fuentes de materia prima (Loera-Quezada, M., & Olguín, E. J.,2010). Sin embargo, el uso de Espirulina (Spirulina spp y Arthrospira spp) no ha sido ampliamente considerado, ya que en México su explotación se enfoca principalmente en la producción de suplementos alimenticios (Espirulina, s. f.)

A pesar de su potencial, el uso de Espirulina para producir biocombustibles enfrenta retos como costos de producción no competitivos y dificultades en los procesos de extracción de lípidos. Sin embargo, mediante el uso de la biotecnología, se están desarrollando estrategias innovadoras para optimizar tanto la producción de biomasa como el contenido lipídico. Estas estrategias incluyen la manipulación genética y el diseño de sistemas de cultivo eficientes, como los fotobiorreactores cerrados, que permiten un control más preciso de las condiciones de crecimiento.

Este trabajo se centra en una revisión detallada de las técnicas de edición genética aplicadas a la Espirulina, abordando los avances tecnológicos que han permitido mejorar sus características para la producción de biocombustibles. Además, se discuten las implicaciones económicas y medioambientales de estas innovaciones, destacando la necesidad de seguir investigando para superar las barreras actuales y hacer de la Espirulina una opción viable para la producción de energía sostenible.

Materiales y métodos

Se trata de una búsqueda y revisión sistemática (también llamada "Systematic search and review" por Grat & Booth, 2009), donde se relacionaron diversos tipos de estudio procedentes de distintas fuentes para delinear un objeto de estudio, construir premisas de partida y hacer relaciones entre trabajos (Valencia-López, 2016; Jurado-Rojas, 2005) con el fin de mostrar una visión sistemática y panorámica de la prevalencia de investigaciones sobre las distintas técnicas de edición genética empleadas sobre algas Espirulina (Arthrospira spp y Spirulina spp) para incrementar la cantidad de biomasa y lípidos con la finalidad de obtener biodiesel.

De este modo, los pasos seguidos para la sistematización y análisis de la información fueron los recomendados por Reyes-Ruíz y Carmona Alvarado (2020). Es decir, se inició con un arqueo de fuentes seguido por la revisión, cotejo, interpretación y elaboración de conclusiones.

Para el arqueo se utilizó el motor de búsqueda de Google Académico y Google convencional filtrando los resultados con base a la importancia de la información, así como por antigüedad (14 años máximo pues en los motores de búsqueda no existía suficiente información de antigüedad menor), además de utilizar los criterios "ordenar por relevancia", "Cualquier idioma", "Artículos de revisión", "Con todas las palabras", "En todo el artículo" y las siguientes oraciones clave escritas; Espirulina, microalgas, cianobacterias, biocombustibles, modificaciones genéticas, cultivo de microalgas, obtención de biocombustibles a partir de microalgas.

Después en la etapa de revisión y cotejo se seleccionaron trabajos de diversa índole mediante la lectura del resumen y la introducción, discriminando aquellos que no abordaran los temas con las palabras clave ya descritas o que abordaran conceptos repetidos. Se consultaron cincuenta artículos y una tesis para la investigación. Para las etapas restantes se analizó la información consultada, de la que derivaron temas comunes los cuales fueron seccionados para su interpretación y posterior conclusión. A continuación, se presentan en forma de subtemas, los temas comunes encontrados y su análisis.

Generalidades de la Espirulina

Espirulina, una cianobacteria perteneciente al filo Cyanobacteria, incluye a los géneros Spirulina y Arthrospira. Estos microorganismos se destacan por su contribución a la producción de oxígeno y su aplicación en diversas áreas biotecnológicas, como la producción de biocombustibles y la biorremediación (Avalos-Flores et al., 2017). Gracias a su adaptabilidad, la Espirulina puede cultivarse en condiciones controladas que garantizan una alta productividad y calidad. El primer aislamiento de un miembro del género Arthrospira fue realizado por el naturalista francés Turpin, quien estableció la clasificación taxonómica del género (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación taxonómica del género Arthrospira

Jerarquía	**Clado**
Dominio:	Prokaryota
Reino:	Eubacteria
Subreino:	Negibacteria
Filo:	Cyanobacteria
Clase:	Cyanophyceae
Subclase:	Oscillatoriales
Orden:	Microcoleaceae
Familia:	*Arthrospira*
Genero:	

Nota: Clasificación taxonómica de Espirulina (Guiry & Guiry. 2015).

Tiempo después, el biólogo Jean Leonard en el Instituto Francés del Petróleo investigó y determino el contenido y composición proteica de Arthrospira (Tabla 2).

Tabla 2. Contenido y composición proteica de Arthrospira spp.

Proteínas	Aminoácido	Contenido (%)
50-70%	Leucina	5.9-6.5
	Valina	7.5
	Isoleucina	6.8
	Lisina	2.6-3.3
	Fenilalanina	2.6-3.3
	Metionina	1.3-2.0
	Triptófano	1.0-1.6
	Tirosina	2.6-3.3
	Acido glutámico	7.3-9.5
	Acido aspártico	5.2-6.0
	Cisteína	0.5-0.7

Nota: Porcentaje de los principales aminoácidos contenidos en Espirulina del género Arthrospira (Cohen, 1997; Sasson, 1997; Sánchez et al., 2003; Ramírez-Moreno & Olvera-Ramírez, 2006).

Una de las principales ventajas de la Espirulina es su alta eficiencia fotosintética, que la posiciona como un recurso prometedor para aplicaciones industriales. Estos organismos no solo generan una biomasa rica en nutrientes, sino que también poseen la capacidad de acumular compuestos de interés biotecnológico, como proteínas y lípidos. Estas propiedades han motivado el desarrollo de técnicas avanzadas de cultivo y manipulación genética para optimizar su rendimiento.

Estos organismos habitan principalmente en lagos alcalinos (pH entre 8-10.2, según Muñoz Puetate 2021), sin embargo, pueden crecer en agua dulce, además debido a su alto contenido nutricional y a su alta tasa de producción de biomasa se cultivan en ambientes acuáticos controlados, utilizando ingeniería genética y otras técnicas para asegurar su calidad e inocuidad (Ramírez-Moreno & Olvera-Ramírez, 2006; Tarazona-Diaz, 2018). La ingeniería genética de microalgas representa un campo fascinante dentro de la biotecnología y se ha desarrollado de manera intensiva, especialmente con el objetivo de optimizar la producción de biocombustibles (Porta, 2021)

Cultivo de Espirulina

Los sistemas de cultivo o biorreactores se suelen clasificar según su configuración, tipo de funcionamiento y aplicación. Dependiendo del destino de la producción se pueden elegir las mejores características de temperatura, pH, nutrientes, intensidad luminosa, entre otros, para un cultivo optimo (Acién-Fernández et al., 2017; Gonzales, 2017; Muñoz-Puetate et al., 2021). Para el caso de la obtención de biocombustibles, se priman aquellos factores que beneficien la obtención de biomasa y lípidos.

El cultivo puede realizarse en sistemas abiertos o cerrados, conocidos como fotobiorreactores (PBR) (Fig. 1). Los sistemas abiertos suelen ser estanques al aire libre expuestos a las condiciones ambientales, como la luz solar y la temperatura. Aunque son menos costosos de construir y operar, su eficiencia es menor debido a la falta de control sobre factores externos, lo que puede llevar a la contaminación por otros microorganismos y a pérdidas de agua por evaporación. Sin embargo, son comunes en la producción comercial a gran escala debido a su simplicidad.



Figura 1. *Fotobiorreactor cerrado. Elaboración propia. Son fotobiorreactores en donde se cultiva la microalga Espirulina en los laboratorios de la Escuela Superior de Apan*

Por otro lado, los sistemas cerrados, o fotobiorreactores cerrados, están diseñados para proporcionar un entorno controlado que optimiza las condiciones de cultivo. Estos sistemas utilizan estructuras como tubos transparentes o tanques sellados que permiten ajustar parámetros como la intensidad de la luz, el flujo de nutrientes y la temperatura. Este control preciso no solo aumenta la eficiencia en la producción de biomasa, sino que también reduce el riesgo de contaminación y permite un uso más eficiente de los recursos. A pesar de su mayor costo inicial, los fotobiorreactores cerrados son ideales para investigaciones científicas y aplicaciones industriales que requieren alta pureza del producto (Ramírez-Mérida et al., 2013).

Para la obtención de biomasa de espirulina, se han encontrado diversas fuentes de nutrientes para su cultivo, destacándose por su fácil producción los medios Schlosser, Zarrouk y Zarruok Modificado o MZM (Huaman, 2021; Muñoz-Puetate et al., 2021; Rojas, Vargas & Saénz, 2017), además de otro medio propuesto por Pablo Antonio López-Pérez (autor de este trabajo), que además de biomasa favorece la producción de lípidos (Tabla 3) el cual se obtuvo a partir de modificar las concentraciones del MZM con resultados satisfactorios.

Tabla 3

Composición del medio de cultivo MZM modificado

Compuesto	Concentración ($g^{*}L^{-1}$)
$NaHCO_3$	16
$NaNO_3$	2.5
NaCl	1.0
$MgSO_4$	0.20
$CaCl_2$	0.04
$FeSO_4$	0.01
EDTA	0.08

Nota: Las concentraciones se obtuvieron mediante experimentación con datos de Rojas, Vargas & Saénz, 2017.

Obtención de Biocombustibles a partir de Espirulina

La producción de biodiesel a partir de microalgas ha despertado un interés creciente en diversos grupos de investigación. Un ejemplo destacado es la empresa española AlgaEnergy (García, 2015b).

Este enfoque presenta múltiples ventajas energéticas, como la capacidad de fijar dióxido de carbono (CO2) y nitrógeno (N) (Fig. 2), contribuyendo significativamente a mitigar el efecto invernadero. Entre sus beneficios se encuentra también el hecho de que no compite con las actividades agrícolas tradicionales y posee una productividad de biomasa entre 30 y 100 veces superior a otras materias primas (De Medio Ambiente y Recursos Naturales, s. f.). Además, su reproducción es extremadamente rápida, duplicando la producción de biomasa, lo que a su vez incrementa la obtención de biodiesel. Este tipo de cultivo requiere menos superficie que los cultivos agrícolas y no depende de herbicidas ni pesticidas. Los derivados de las microalgas encuentran aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica y agrícola (García, 2015).

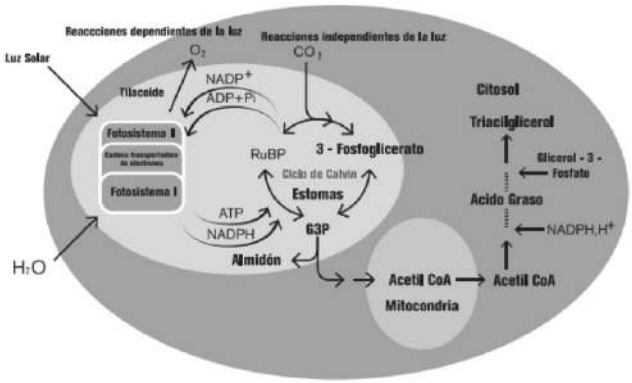


Figura 2. Esquema de la fotosíntesis, fijación de CO2 y acumulación de células microalgales. Fuente: Zeng et al., 2011.

Sin embargo, existen desventajas en la producción de biodiesel a partir de microalgas. La concentración de biomasa en los cultivos y el contenido lipídico de las células afectan los costos de extracción y transformación. Cuanto mayor sea el contenido deseado de lípidos, más elevados serán los costos de producción (Demirbas, 2010). Cabe mencionar que, en la actualidad, no se han establecido plantas comerciales masivas dedicadas exclusivamente a la producción de biodiesel a partir de microalgas, lo que limita la evaluación precisa de su potencial.

A pesar de las limitaciones, el uso de Espirulina podría representar avances innovadores para la sociedad. Entre estos se incluyen el tratamiento eficiente de aguas residuales, la biorremediación de suelos, la obtención de pigmentos naturales y la producción de biocombustibles (Avalos-Flores et al., 2017). Por otra parte, la biotecnología ha logrado avances notables en la generación de biocombustibles líquidos a partir de biomasa, los cuales representan una fuente renovable y abundante en regiones donde los combustibles fósiles no son accesibles (Stephanopulus et al., 2014).

En años recientes, se han evaluado los impactos económicos y ambientales de biocombustibles como etanol, metano, hidrógeno y biodiesel. El biodiesel, en particular, se destaca como la tecnología más prometedora para sustituir combustibles derivados del petróleo, especialmente en el sector transporte. Además, reduce las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) hasta en un 70-90% en comparación con el diésel convencional (Younes Dautor, 2014).

Los gastos de producción de biodiesel pueden compensarse mediante la comercialización de coproductos derivados de la biomasa. Las microalgas contienen proteínas, carbohidratos y compuestos de gran importancia, como astaxantina, carotenos, clorofila, ácidos grasos libres y ácido linoleico (Rashid et al., 2014). Estos componentes tienen aplicaciones industriales en biorrefinerías, consideradas industrias de doble propósito (Castillo et al., 2017).

Estudios recientes indican que la producción industrial de biodiesel es económicamente viable si se optimiza la estrategia de refinado basada en la biomasa (Younes Dautor, 2014). Según Castillo et al. (2017), el proceso consta de tres fases principales: 1) cultivo de cepas para generar biomasa, 2) recolección de biomasa y ruptura celular, y 3) reacción de esterificación para transformar los compuestos en biodiesel (Koller et al., 2012). Diversas tecnologías pueden mejorar estos procesos, como el uso de sustratos ricos en azúcares específicos (xilosa, arabinosa) involucrados en el ciclo de las pentosas fosfato para aumentar la acumulación de lípidos (Cho et al., 2015). Otros enfoques incluyen tratamientos de hidrólisis o el enriquecimiento de medios de cultivo con mioinositol, lo cual favorece la acumulación de lípidos y biomasa en microalgas (Mu et al., 2015; Gui et al., 2014).

La reducción del nitrógeno y la adición de iones metálicos y sales, como el EDTA, también inducen estrés en las microalgas, incrementando la producción de lípidos (Ren et al., 2014; Liu et al., 2016). Adicionalmente, diversas técnicas biotecnológicas se enfocan en maximizar la cantidad de lípidos y biomasa, mejorando así la eficiencia en la obtención de biodiesel.

Modificación genética de Espirulina

La ingeniería genética, conocida también como modificación genética, comenzó a formar parte de nuestro vocabulario durante la década de 1970 para referirse a las innovadoras técnicas de recombinación de ADN. Este proceso emplea herramientas de laboratorio que permiten modificar la composición genética de un organismo de manera controlada. Una de sus principales ventajas es que no requiere transferir numerosos genes, algunos de los cuales podrían presentar características no deseadas, sino que permite introducir únicamente uno o pocos genes que aportan propiedades específicas de interés (Ingeniería Genética, s. f.).

A lo largo del tiempo, la investigación biotecnológica de las microalgas ha despertado un gran interés, particularmente en la producción de biomasa destinada a la alimentación de peces, ganado y humanos. Más recientemente, este interés se ha extendido a otros campos, como la generación de biocombustibles, obtención de pigmentos como ficocianina y aloficocianina, carotenoides (como el caroteno o las xantofilas) y compuestos como el almidón (Porta, H., 2021).

El genoma de la Espirulina, tomando como referencia la cepa NIES-39, está compuesto por un cromosoma circular de 6.8 Mb. Este contiene 6,630 genes codificantes de proteínas, además de dos conjuntos de genes de ARN ribosomal (RNAr) y 40 genes de ARN de transferencia (RNAt). Cabe destacar que el 78% de estos genes se consideran constitutivos, lo que significa que se comparten con otros organismos (Figura 3) (Spirulina: El Potencial Biotecnológico y Alternativo de un Alimento Poco Convencional, 2017).

La modificación genética de las cianobacterias, como la Espirulina, resulta relativamente sencilla. Esto se debe a que algunas cianobacterias tienen la capacidad natural de ser transformadas, mientras que otras han sido manipuladas mediante sistemas no biológicos, como el uso de electroporación (Koksharova y Wolk, 2002).

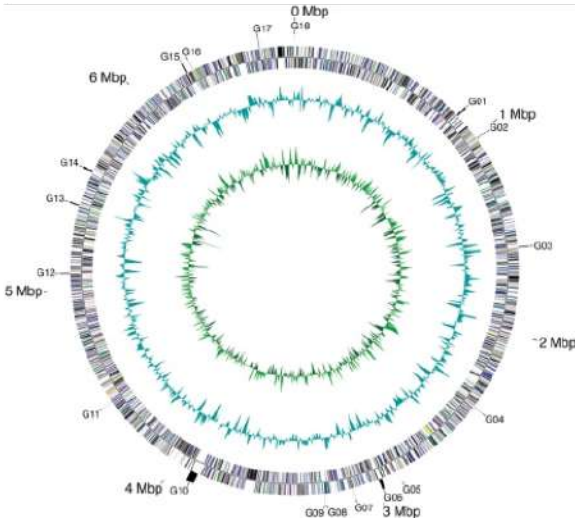


Figura 3. Representación esquemática del cromosoma circular de Espirulina (Arthrospira platensis). Tomada del programa Blast Databases a partir de la Cepa NIES-39w Pryan et al., (2019).

Nota: La escala indica las coordenadas en pares de Mb. De fuera a dentro: círculo 1, los huecos en el genoma; círculos 2 y 3, genes predichos codificadores de proteínas en las cadenas directa e inversa; círculo 4, contenido de G+C; círculo 5, proporción de GC. Se han numerado dieciocho contig gaps (G01-G18) en el sentido de las manecillas del reloj, empezando por el final del contig más largo. Las categorías funcionales se codificaron por colores según los colores estándar utilizados por los COG.

Técnicas para la transformación de microalgas

Para insertar una secuencia de DNA en el genoma de una célula huésped, existen diversas técnicas que incluyen métodos físicos, químicos (denominados no biológicos) y biológicos. Independientemente del sistema utilizado, es importante considerar factores como la eficiencia de transformación, el costo, la reproducibilidad y la capacidad para generar múltiples eventos de transformación (Porta, 2021).

Los métodos no biológicos más comunes para transformar microalgas incluyen la biobalística, la electroporación y la transformación con partículas de vidrio o de carburo de silicio. En cuanto a los métodos biológicos, se emplean sistemas como la transformación mediante *Agrobacterium*, conjugación y el uso de protoplastos (Qin et al., 2012; Ortiz-Matamoros, 2018, p. 40). A continuación, se describen estas técnicas.

Sistemas de transformación mediados con agentes no biológicos

Estos sistemas emplean procedimientos químicos, fisicoquímicos o mecánicos para transferir genes. Muchas de estas técnicas se basaron en métodos empleados previamente para transformar células animales (Díaz et al., 2004; Gutiérrez et al., 2002; Danilova, 2007; Rao et al., 2009).

Sonicación

Descrito por Brown y Bischorf en 1962, este método se utiliza para transferir genes en tejidos vegetales, células intactas y protoplastos mediante ultrasonidos de frecuencias superiores a 20 kHz. Estas frecuencias generan poros transitorios en las membranas celulares, permitiendo la

entrada del DNA foráneo (Granados & Chaparro-Giraldo, 2012).

El proceso de sonicación se basa en el fenómeno de cavitación acústica, donde burbujas de vapor colapsan, generando ondas de choque y pequeños chorros líquidos que rompen estructuras celulares. En el contexto de la modificación de algas para la producción de biocombustibles, la sonicación juega un papel clave en varios aspectos del procesamiento de las algas y la extracción de compuestos útiles, como los lípidos, que se utilizan para producir biocombustibles como el biodiésel, este método facilita la extracción de lípidos en algas, aumentando su producción en un rango del 10-30%, lo cual es crucial en la producción de biocombustibles como el biodiésel (Mehier-Humberta et al., 2005; Miller et al., 2002).

Las células de las algas tienen paredes celulares resistentes, lo que dificulta la extracción de los lípidos que se encuentran dentro de ellas y la sonicación se utiliza para romper o debilitar estas paredes celulares mediante la generación de pequeñas burbujas de vapor que producen fuerzas mecánicas intensas, este proceso es el que facilita la liberación de los lípidos (Fig 4)



Figura 4. Homogeneizadores ultrasónicos UP100H y UP400St: Sonicación para lisis y extracción celular. Tomada de Feng, Hao & Barbosa-Canovas, Gustavo & Weiss, Jochen. (2011)

Ventajas y desventajas del método

La sonicación permite introducir ADN foráneo de manera eficiente y trabajar con diversos tipos de células. Sin embargo, puede causar daños en la pared celular y alteraciones en la permeabilidad de la membrana (Díaz Granados & Chaparro-Giraldo, 2012).

Electroporación

La electroporación no es mas que, un aumento significativo de la conductividad eléctrica mediante un campo eléctrico aplicado externamente, en la que se afecta la permeabilidad de la membrana plasmática celular (Rathod et al. 2017). Las membranas celulares se desestabilizan temporalmente, lo que provoca una pérdida momentánea de su permeabilidad. Esto da lugar a la formación de poros transitorios que permiten el paso de macromoléculas, la fuga de iones, la salida de metabolitos y una mayor captación de ADN por parte de las células (Krassowska & Filev, 2007; Fox et al., 2006).

Este mecanismo se lleva a cabo con un equipo conocido como electroporador (Fig. 5), el cual utiliza descargas de capacitores para producir pulsos de alto voltaje. Dichos pulsos generan una corriente eléctrica que atraviesa la suspensión que contiene las células, permitiendo la permeabilización de las membranas y facilitando la incorporación de ADN externo, el cual se utiliza para transformar las células (Granados y Chaparro-Giraldo, 2012).

El ADN exógeno que se pretende introducir debe encontrarse presente en la solución junto con las células a transformar. Normalmente, este ADN, o genes de interés, está contenido en un plásmido (Fox et al., 2006; Chen et al., 2006). Para ello, las células son expuestas a pulsos eléctricos controlados de alto voltaje (estos oscilan entre los 200 200 V/cm y los 600 V/cm) y de corta duración, que van desde microsegundos hasta milisegundos (Tarek, 2005; Chen et al., 2006)

Cuando el voltaje aplicado a la membrana plasmática supera su rigidez dieléctrica, que es la capacidad del material para resistir la conducción eléctrica, se generan poros en la membrana. Si el campo eléctrico y la duración de la exposición se ajustan correctamente, estos poros se cierran después de un breve periodo, durante el cual los compuestos externos pueden ingresar a la célula. Sin embargo, una exposición prolongada o excesiva a estos campos eléctricos puede provocar daños irreversibles en las membranas y la muerte celular (Mohan Babua et al. 2003; Larik et al. 2004)



Figura 5. Electroporador. Tomada de BTX Sistema de Electroporación ECM 830, Con Soporte de Seguridad - Analizadores E Instrumentos Clínicos, Electroporadores, s. f.

La electroporación es fundamental para la modificación genética de algas, permitiendo introducir mejoras que potencien la acumulación de lípidos y otras características que hacen que las algas sean más eficientes y viables para la producción de biocombustibles ya que estos son precursores del biodiésel. Mediante la electroporación, se pueden insertar genes que modifiquen las rutas metabólicas, como la acumulación de triglicéridos y la inhibición de rutas metabólicas competidoras que desvían energía y recursos de la síntesis de lípidos, esta técnica es medianamente efectiva ya que el porcentaje de aumento de lípidos esta entre el 30-50%.

Ventajas y desventajas del método

Es más efectivo que la transformación por métodos químicos, también es eficiente y de fácil manejo; además, es el que con más frecuencia se utiliza, aunque, por otra parte, se emplean protoplastos lo cual hace que se implementen otras técnicas, y esto lo hace más caro en comparación con otros métodos (Porta, 2021)

Transformación mediada por partículas de vidrio o de carburo de silicio

Es una metodología descrita recientemente, esta técnica utiliza fibras de carburo de silicio de entre 10 y 80 µm de longitud y aproximadamente 0,5 µm de diámetro. Estas fibras, al actuar como micro agujas, penetran las células vegetales, permitiendo la introducción del ADN foráneo al interior celular (Fig 6).

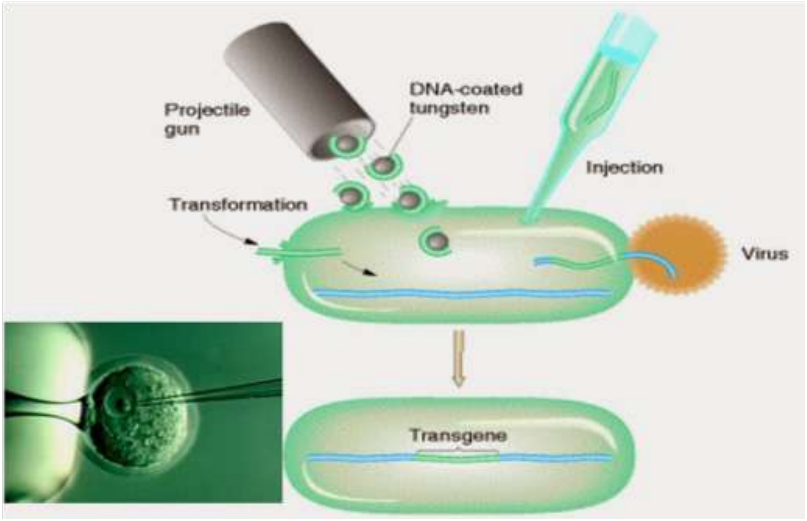


Figura 6. Transformación mediada por partículas de vidrio o de carburo silicio. Tomada de Apuntes de Fisiología Vegetal, s. f.

El procedimiento se caracteriza por ser rápido, simple y relativamente económico en comparación con otros métodos de transformación. El proceso utiliza fibras de carburo de silicio que son notables a simple vista. A través de una intensa agitación de la suspensión celular en conjunto con el ADN plasmídico y las fibras de carburo de silicio, las fuerzas hidrodinámicas generadas permiten la introducción del ADN externo y de las fibras de carburo de silicio en las células.

Sin embargo, presenta limitaciones en términos de eficiencia, alcanzando tasas de éxito que varían entre el 20% y el 40%. Además, el material empleado, como el carburo de silicio, puede ser tóxico para las células y los operarios, lo que supone un riesgo añadido a considerar durante su implementación (Mizuno et al., 2005; Rao et al., 2009).

Sistemas de transformación mediados con agentes biológicos

Se trata de métodos que aprovechan vectores biológicos, utilizando sus propiedades naturales de patogenicidad en plantas, para la insertar los genes de interés al genoma vegetal (Veluthambi et al., 2003; Rao et al., 2009).

Agrobacterium

Agrobacterium funciona como mediador para la introducción de genes de interés (Hellens & Mullineaux, 2000; Tzfira et al. 2004). Fue el primer sistema de transferencia de genes en producir una planta modificada genéticamente en 1983 (Valentine, 2003; Vasil, 2007)

Este proceso inicia cuando se producen heridas en las células de la planta, se liberan al medio compuestos fenólicos y monosacáridos, que son reconocidos por *Agrobacterium*, induciendo una unión entre la bacteria y las células vegetales (Fig 7) (Citovsky et al. 2007; Escobar & Dandekar, 2003; Karami et al. 2009). Los compuestos fenólicos, monosacáridos y condiciones de pH que presenta el medio circundante son importantes para la activación del sistema de regulación (Valentine, 2003; Tzfira et al. 2004; Pitzschke & Hirt, 2010)

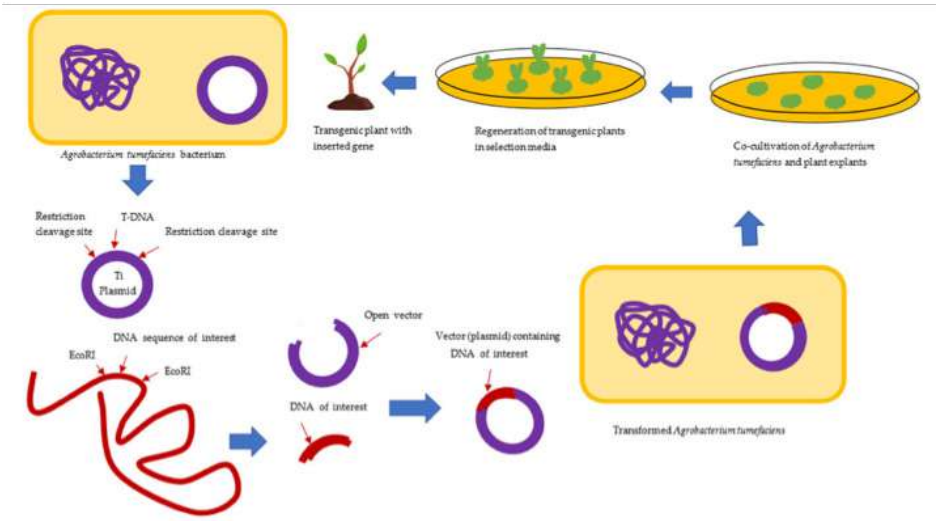


Figura 7. Transformación genética de la planta mediada por *Agrobacterium*. El diagrama esquemático muestra los pasos asociados con la clonación del gen de interés en el plásmido Ti de *Agrobacterium* tumefaciens y su transferencia a células vegetales en cultivo para regenerar las plantas transgénicas con características deseables. Tomada de Ghimire, Bimal & Yu, Chang-Yuan & Kim, Won-Ryeol & Moon, Hee-Sung & Lee, Joohyun & Kim, Seung & Chung, Ill. (2023)

El sistema de transformación mediado por *Agrobacterium* requiere el uso de cepas desarmadas, que son aquellas a las que se les ha eliminado el T-DNA. Este procedimiento implica modificar el plásmido residente a través de un proceso de recombinación que elimina los oncogenes, responsables de inducir tumores en las plantas, y los genes OPS relacionados con la síntesis de opinas presentes en la región del T-DNA (Gelvin, 2003b; Jacobs, 2003; Gelvin, 2010; Pitzschke & Hirt, 2010).

Para desarmar la cepa de *Agrobacterium*, se introduce un plásmido externo que contiene regiones homólogas al T-DNA y un gen que confiere resistencia a antibióticos. Mediante el proceso de recombinación entre ambos plásmidos, se logra eliminar el T-DNA original e integrar el gen de resistencia al plásmido. Esto facilita la identificación de bacterias desarmadas, ya que el plásmido externo que contenía la región T-DNA es eliminado durante el procedimiento (Gelvin, 2003b; Jacobs, 2003; Gelvin, 2010; Pitzschke & Hirt, 2010).

A continuación, se sintetiza el T-DNA gracias a la acción conjunta de las proteínas VirD1 y VirD2. La proteína VirD2 se une covalentemente al extremo 5' del T-DNA, mientras que la proteína VirE2 recubre la hebra completa. Este complejo es transferido a las células vegetales mediante un sistema de secreción tipo IV, compuesto por un pili y un canal de secreción formados por las proteínas VirB y VirD4. Una vez que el T-DNA alcanza la célula vegetal, las proteínas VirE2 y VirD2 lo dirigen hacia el núcleo, donde se integra al genoma de la planta (Tzfira & Citosky, 2002; Tzfira et al., 2004; Citovsky et al., 2007; Escobar & Dandekar, 2003).

La transformación utilizando *Agrobacterium* implica un periodo de co-cultivo, en el cual la cepa portadora del vector con los genes de interés entra en contacto con el tejido vegetal a transformar. Durante este proceso, se facilita la transferencia del T-DNA a las células vegetales (Vasil, 2007; Sharma et al., 2002).

El co-cultivo debe realizarse en un medio específico que favorezca el proceso de transformación. Tras este período, el tejido vegetal es transferido a un medio de cultivo adecuado para la regeneración. Para obtener plantas completas, es necesario añadir hormonas vegetales o reguladores del crecimiento al medio. Además, se incluyen antibióticos para eliminar cualquier resto de *Agrobacterium*, ya que su función culmina tras el co-cultivo, y agentes selectivos para identificar las plantas transgénicas en función de los genes de selección utilizados (Bhat & Srinivasan, 2002; Filipecki & Malepszy, 2006).

Agrobacterium es utilizado como vehículo para introducir genes en plantas y algas. En el caso de Espirulina, se pueden incorporar genes que optimicen la producción de biomasa, aumenten la eficiencia fotosintética o mejoren la resistencia a condiciones adversas. Esto es que, incrementa la cantidad de lípidos producidos entre un 40-70% según lo reportado por Kroemer (2024)

Ventajas y desventajas

Este método asegura una alta expresión de los genes deseados. Sin embargo, requiere la eliminación de la bacteria mediante antibióticos y no siempre garantiza la integración efectiva en todos los casos (Guo et al., 2019)

Transformación de protoplastos

Los protoplastos han sido ampliamente empleados como una herramienta biotecnológica en procesos de transformación. Estas son células vivas que carecen de pared celular, tienen características homogéneas y una capacidad totipotencial. Existen diversos protocolos para la obtención de protoplastos en microalgas, los cuales consideran factores como el tipo de enzima utilizada para degradar la pared celular, el pH, tiempo de tratamiento. Y la presencia de azucares para mantener el equilibrio osmótico y preservar la integridad celular (Reddy et al. 2010).

Al transformar los protoplastos, se pueden introducir genes que mejoren la producción de lípidos, compuestos esenciales para la producción de biodiésel. El proceso parece muy sencillo, ya que solo eliminamos las paredes celulares del alga para poder manipular su material genético, posteriormente introducimos el gen deseado; las células transformadas las cultivamos en condiciones controladas y por último extraemos los lípidos para procesarlos y convertirlos en biocombustible, este proceso nos da un rendimiento aproximado de 30-60%.

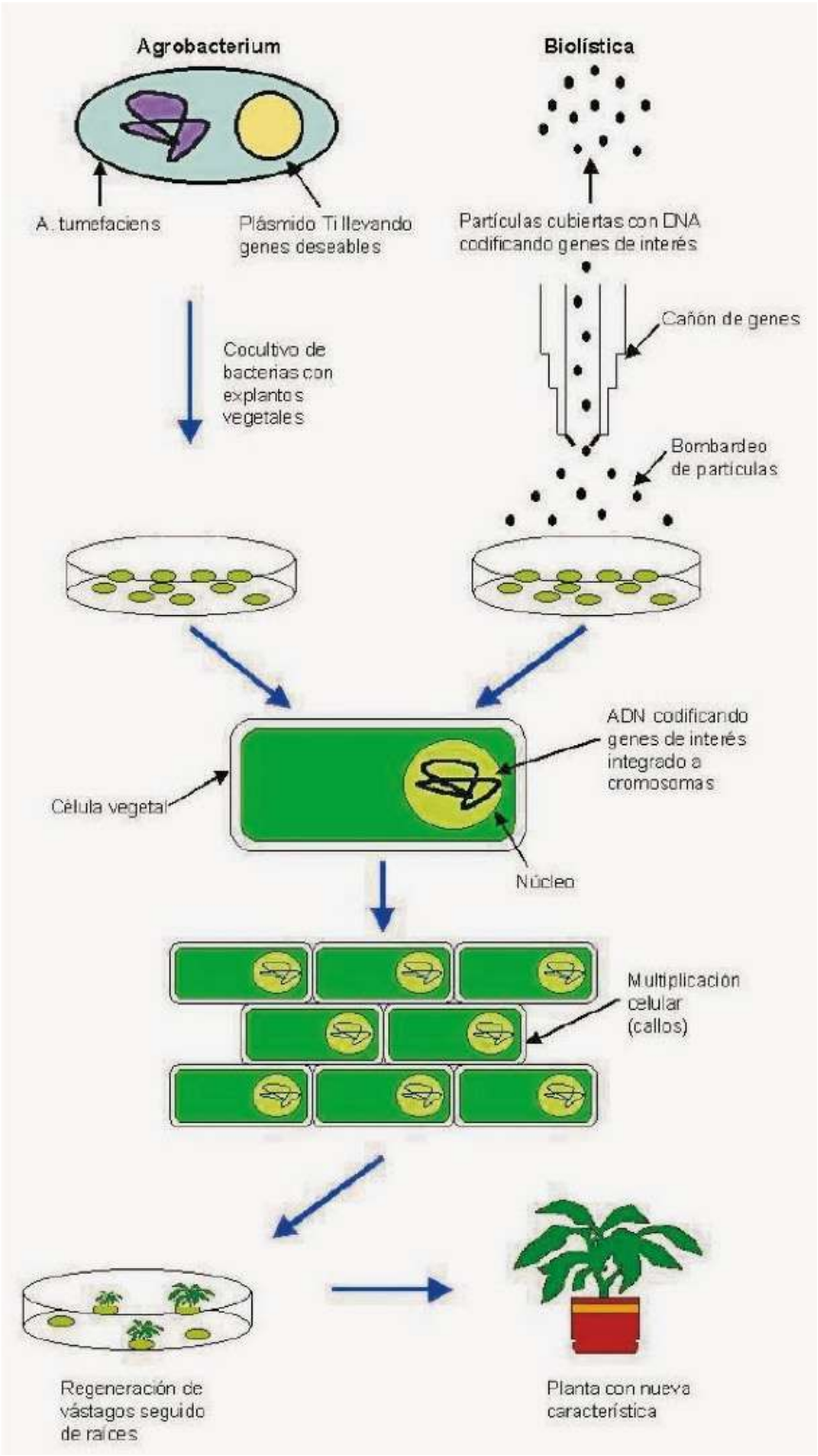


Figura 8. Comparación de técnicas de transformación directa e indirecta. Tomada de Apuntes de Fisiología Vegetal, s. f

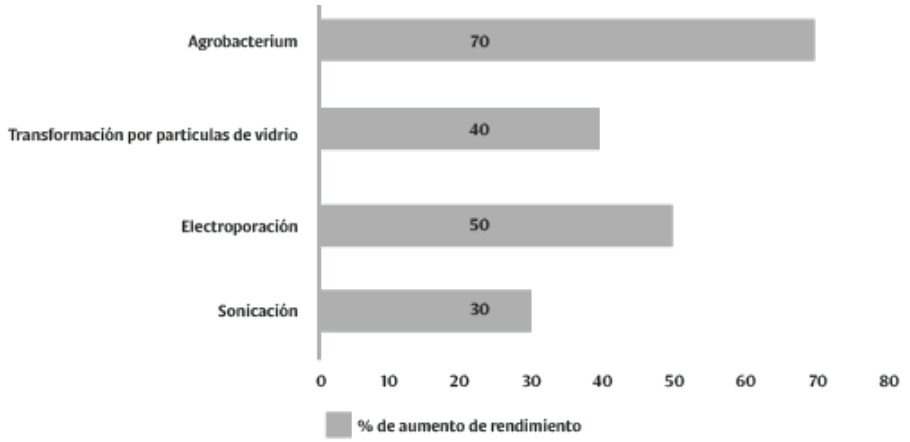


Figura 9. *Comparación del aumento del rendimiento en cada técnica de transformación.* Elaboración propia con base en los datos reportados en el artículo.

Conclusiones

La disminución de las reservas petroleras y la contaminación causada por la quema de combustibles fósiles son dos problemas importantes en el mundo. La búsqueda de alternativas sostenibles, y la concientización ambiental como menciona Piñar-Alvarez (2024), nos ha llevado a buscar alternativas como el uso de microalgas para producir biodiesel, y esto a su vez, se ha convertido en una opción prometedora.

La revisión teórica realizada reveló que la modificación genética puede incrementar la productividad de la biomasa de Espirulina, lo que resultaría en bioproductos más competitivos en el mercado, especialmente en el contexto de los biocombustibles. Las técnicas de transformación, como la electroporación, la transformación mediada por *Agrobacterium* y la Sonicación ofrecen ventajas específicas, pero es fundamental considerar tanto las ventajas como las limitaciones de cada método para tomar decisiones informadas. La obtención de biocombustibles a partir de microalgas representa una solución prometedora, y la producción de biodiésel a partir de microalgas ha atraído un interés significativo en la comunidad científica.

A pesar de los retos, las microalgas son consideradas como una de las alternativas para la obtención de biodiésel, y en particular la Espirulina ya que su cultivo se ha hecho desde hace muchos años en México y es considerado como un super alimento, además de presentar una rápida producción de biomasa en comparación con otros cultivos. Aunque hay información de como cultivarla a gran escala, se considera que hay que desarrollar nuevas tecnologías nacionales para la obtención de biodiesel.

Este tipo de desarrollo evitará en un futuro la dependencia energética, y será una respuesta más ecológica y sustentable.

La importancia del tema radica en la necesidad de productos energéticos sostenibles y amigables con el medio ambiente, así como nos mencionan Velazquez-Cigarroa y Castro-Martinez (2024). La modificación genética de las microalgas y las técnicas para la introducción de secuencias de ADN son áreas de estudio para mejorar la producción de biomasa y lograr bioproductos más competitivos en el mercado.

Referencias

Acién-Fernández, F. G., Fernández-Sevilla, J. M., y Molina-Grima, E. (2017). Contribución de las microalgas al desarrollo de la bioeconomía. Mediterráneo Económico, 31, 309-331. ISSN: 1698-3726 | ISBN-13: 978-84-95531-89-6

Amin, S. (2009). Review on biofuel oil and gas production processes from microalgae. Energy Conversion and Management, 50(7), 1834-1840.

Arias Peñaranda, M. T., Martínez Roldán, A. D., y Cañizares Villanueva, R. O. (2013). Producción de biodiesel a partir de microalgas: parámetros del cultivo que afectan la producción de lípidos. Acta Biológica Colombiana, 18(1), 43-68.

Avalos-Flores, H., Cázares-Álvarez, E. E., y Rodríguez-Valdovinos, K. Y. (2017). Spirulina: El potencial biotecnológico y alternativo de un alimento poco convencional. Universidad de La Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo. México. 216 pág. ISBN 978-607-9442-59-0.

BBVA Noticias. Comunications (2024), ¿Qué es la energía? Concepto y tipologías

Beranova, M., Rakousky, S., Va´Vrova, Z., y Skalicky, T. (n.d.). Sonication assisted *Agrobacterium*-mediated transformation enhances the transformation efficiency in flax. Plant Cell Tissue and Organ Culture.

Brennan, L., y Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(2), 557-577.

Castells, X. E. (2012). Energía, agua, medioambiente, territorialidad y sostenibilidad. Ediciones Díaz de Santos.

Castillo, O. S., Torres-Badajoz, S. G., Núñez-Colín, C. A., Peña-Caballero, V., Herrera Méndez, C. H., y Rodríguez-Núñez, J. R. (2017). Producción de biodiésel a partir de microalgas: avances y perspectivas biotecnológicas. Hidrobiológica, 27(3), 337-352.

Castillo, O. S., Torres-Badajoz, S. G., Núñez-Colín, C. A., Peña-Caballero, V., Herrera Méndez, C. H., y Rodríguez-Núñez, J. R. (2017). Producción de biodiésel a partir de microalgas: avances y perspectivas biotecnológicas. Hidrobiológica, 27(3), 337-352.

Chen, C. Y., Yeh, K. L., Aisyah, R., Lee, D. J., y Chang, J. S. (2011). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. Bioresource Technology, 102(1), 71–81.

Chinnasamy, S., Bhatnagar, A., Hunt, R. W., y Das, K. (2010). Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biofuel applications. Bioresource Technology, 101(9), 3097-3105.

Cho, K., Kim, K., Lim, N., Kim, M., Ha, J., Ho, H., y Woon, S. (2015). Enhanced biomass and lipid production by supplement of myo-inositol with oceanic microalga Dunaliella salina. Biomass and Bioenergy, 72, 1-7.

Conceptos Básicos y avances de la transformación ... Conceptos básicos y avances de la transformación genética de las microalgas. (2021).

Cruz Woo, G. (2022). Manual para el cultivo artesanal de espirulina (Arthrospira spp.) en San Salvador Atenco, México. [Tesis, Universidad Autónoma Metropolitana]. https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/bitstream/123456789/26746/1/250170.pdf

Demirbas, A. (2019). Progress and recent trends in biodiesel fuels. Energy Conversion and Management, 50(1), 14-34.

Díaz Granados, C., y Chaparro-Giraldo, A. (2012). Métodos de transformación genética de plantas. Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica, 15(1), 131-140.

Feng, H., Barbosa-Canovas, G., y Weiss, J. (2011). Ultrasound technologies for food and bioprocessing.

Fernández-Linares, L. C., Montiel-Montoya, J., Millán-Oropeza, A., y Badillo-Corona, J. A. (2012). Producción de biocombustibles a partir de microalgas. *Ra Ximhai*, 8(3b), 101-115.

García, C. M. (2015, 13 de noviembre). Biodiesel a partir de microalgas: ventajas y desventajas. AINEnergia

García, C. M. (2015, 7 de diciembre). Viabilidad de las microalgas: estudio energético y económico. AINEnergia

Gelvin, S. B. (2003). *Agrobacterium*-mediated plant transformation: the biology behind the “gene-jockeying” tool. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 67(1), 16–37.

Genome. Gov, 2023. Ingenieria genetica. www.genome.gov/es/genetics-glossary/Ingenieria-genetica.
Ghimire, B., Yu, C.-Y., Kim, W.-R., Moon, H.-S., Lee, J., Kim, S., y Chung, I. (2023). Assessment of benefits and risk of genetically modified plants and products: Current controversies and perspective. Sustainability, 15, 1722. https://doi.org/10.3390/su15021722
Gonzáles, C. A. (2017). Cultivos de microalgas a gran escala: sistemas deproducción. Revista ADNAgro, 18, 1-14.
Gui, X., Wang, G., Li, X., y Yan, Y. (2014). Fungus-assisted mild acid pretreatment of Glycyrrhiza uralensis residues to enhance enzymatic hydrolysis and oil production by green microalgae Chlorella protothecoides. Industrial Crops and Products, 62, 466-473.
Hernández Ramírez, V., Rosales Paredes, J. C., & Hernández Rodríguez, H. A. (2024). Análisis fisicoquímico de un biofertilizante hidrolizado para uso en la agricultura. Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical, 4(1), 1–11. https://doi.org/10.5154/r.rchsat.2023.04.02
Hernández-Pérez, A., y Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía,* 49(2), 157-173.
Janssen, M., de Winter, J., Tramper, J., Mur, L., Snel, J., y Wijffels, R. (2000). Efficiency of light utilization of Chlamydomonas reinhardtii under medium-duration light/dark cycles. Journal of Biotechnology, 78, 123-137
Jiménez Martínez, N. M. y García Barrios, R. (2022). La gestión de residuos para combatir el cam-bio climático. Perspectivas Energéticas, 6 (15), 19-28
Koller, M., Salerno, A., Tuffner, P., Koinigg, M., Böchzelt, H., Schober, S., Pieber, S., Schnitzer, H., Mittelbach, M., y Braunegg, G. (2012). Characteristics and potential of microalgal cultivation strategies: A review. Journal of Cleaner Production, 37, 377-388.
León Vaz, A. (2021). Aplicaciones biotecnológicas y medioambientales de la microalga Chlorella sorokiniana. Tesis de doctorado, Universidad de Huelva.
Liu, T., Li, Y., Liu, F., y Wang, C. (2016). The enhanced lipid accumulation in oleaginous microalga by the potential continuous nitrogen-limitation (CNL) strategy. Bioresource Technology, 203, 150-159.
Loera-Quezada, M., y Olguín, E. J. (2010). Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel: retos y oportunidades. Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental Algal, 1(1), 91-116.

Mehier-Humbert, S., Bettinger, T., Yan, F., y Guy, R. (2005). Ultrasound-mediated gene delivery: Kinetics of plasmid internalization and gene expression. Journal of Controlled Release: Official Journal of the Controlled Release Society, 104(2), 203-211.
Mu, J., Li, S., Chen, D., Xu, H., Han, F., Feng, B., y Li, Y. (2015). Enhanced biomass and oil production from sugarcane bagasse hydrolysate by heterotrophic oleaginous microalga Chlorella protothecoides. Bioresource Technology, 185, 99-105.
Navarro-Lopez (2011). Biotecnologia de microalgas: Produccion de biodiesel. Universidad de Almeria
Ortiz-Matamoros, M. F., Villanueva, M. A., e Islas-Flores, T. (2018). Genetic transformation of cell-walled plant and algae cells: delivering DNA through the cell wall. Briefings in Functional Genomics, 17(1), 26–33.
Piñar-Álvarez, M.A. y Mondragon de la Peña, I. L. (2024). Participación social y sensibilización am-biental para el manejo de residuos municipales en Banderilla, Veracruz, México. Revista Electró-nica en Educación y Pedagogía, 8(14), 108-124. doi: https://doi.org/10.15658/rev.electron.educ.pedagog24.02081407
Pralhad Rathod, J., Gad, R. M., Rathod, D. R., y Dudhare, M. (2017). A review on molecular tools of microalgal genetic transformation and their application for overexpression of different genes. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 6(12).
Qin, S., Lin, H., y Jiang, P. (2012). Advances in genetic engineering of marine algae. Biotechnology Advances, 30(6), 1602–1613.
Ramírez-Mérida, L. G., Queiroz-Zepka, L., y Jacob-Lopes, E. (2013). Photobioreactor: Tool for mass cultivation of cyanobacteria. Ciencia y Tecnología, 6(2), 9-19. ISSN 1390-4043.
Ramos-Cruzate, L. A. (2020). Análisis de experiencias de mejora continua en la producción industrial de

spirulina. Una revisión sistemática. Repositorio Institucional UPN
Ren, H.-Y., Liu, B.-F., Kong, F., Zhao, L., Xie, G. J., & Ren, N.-Q. (2014). Enhanced lipids accumulation of green microalga Scenedesmus sp. by metal ions and EDTA addition. Bioresource Technology, 169, 763-767.
Renovables, E. (n.d.). CO2 AlgaeFix continúa para desarrollar una biorrefinería e instalar el mayor fotobiorreactor del mundo. Energías Renovables, el Periodismo de las Energías Limpias.
Repsol (2024). ¿Qué son los biocombustibles? Tipos y principales ventajas. https://www.repsol.com/es/tecnologia-digitalizacion/technology-lab/reduccion-emisiones/biocombustibles/index.cshtml
Rojas, D., Vargas, G., y Saénz, A. (2017). Evaluación del crecimiento de Spirulina platensis UTEX 1926 cultivada en medios salinos, utilizando CO2 como fuente de carbono. Universidad EAFIT
Sinche, D. Petroenergía. (2013). Cultivo de microalgas mediante el uso de fotobiorreactores. https://www.petroenergia.info/post/biocombustibles-de-tercera-generaci%C3%B3n-el-potencial-de-las-microalgas
Sproles, A. E., Fields, F. J., Smalley, T. N., Le, C. H., Badary, A., y Mayfield, S. P. (2021). Recent advancements in the genetic engineering of microalgae. Algal Research, 53, 102158.
Tarek, M. (2005). Membrane electroporation: A molecular dynamics simulation. Biophysical Journal, 88(6), 4045-4053.
Turiel, A. (2020). Petrocalipsis: Crisis energética global y cómo (no) la vamos a solucionar. Editorial Alfabeto.
Velazquez-Cigarroa, E., y Castro-Martinez, O., (2024). Educacion ambiental y sustentabilidad: Aportaciones multidisciplinarias para el desarrollo. Instituto de Investigaciones Socioambientales, Educativas y Humanisticas para el Medio Rural (IISHEMER)

Derechos de Autor© 2025 Coronado-Tovar, Ariadne; Herrera-Monroy, Sonia; López-Pérez, Pablo Antonio



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Propuesta de estrategias de gestión de residuos sólidos en la ciudad de Santa Ana, el Salvador

Proposal for solid waste management strategies in the city of Santa Ana, el Salvador

Mario Jose Lucero Culi[1*]
DOI: 10.56643/rcia.v4i1.185

Como citar este artículo: **Lucero Culi, M.J. (2025). Propuesta de estrategias de gestión de residuos sólidos en la ciudad de Santa Ana, el Salvador.** ***Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura.*** **4(1). 59-72. DOI: https://doi.org/10.56643/rcia.v4i1.185**

Resumen

Según las proyecciones de población realizadas, en 2023 la ciudad de Santa Ana contaba con una población de 398,351 habitantes, cuya Producción Per-Cápita (pcp) de residuos, alcanzaba 1.10 Kg. hab/d. Se estima que en 2040 la ciudad tendrá 454,734 habitantes, con una pcp de 1.3 Kg. hab/d. El objetivo de esta investigación es determinar las estrategias de gestión de residuos más adecuadas a través de la Gestión Integral de Residuos, que prioriza el tratamiento de los mismos antes de realizar su disposición. Para determinar dichas estrategias, se emplearon estimaciones de generación y eficiencias de diversos tratamientos aplicados y recogidos en publicaciones indexa-das a los residuos producidos. La estrategia de gestión sugerida establece que de las 592.41 T/d, 201.39 T/d deben ser recicladas; 343.54 T/d corresponden a materia orgánica que, tras ser tratada por digestión anaerobia, generan 185.51 T/d de un residuo conocido como digestato; éste puede ser aplicado al compostaje, produciendo 46.38 T/d de compost. La digestión anaerobia puede generar alrededor de 36.8 MW de electricidad en promedio. Así, la estrategia de gestión sugerida permite aprovechar los residuos, ya sea en reciclaje o en generación de energía, utilizando el biogás produ-cido por la digestión anaerobia mediante la incineración.

Palabras Clave: Gestión de Residuos Sólidos, Digestión Anaerobia, Compostaje, Incineración, Energía renovable.

Abstract

According to population projections, the city of Santa Ana holds 398,351 inhabitants in 2023, with a Per-Capita Production of 1.10 Kg. inhabitant/d. By the year 2040, it is estimated that the-re will be 454,734 inhabitants with a PCP of 1.3 kg per person/d. The objective of the research is to determine waste management strategies through Comprehensive Waste Management that prioritizes treatment before disposal. The determination methodology was based on the use of estimates of generation and efficiencies of a certain treatment applied to the waste produced, ob-tained from indexed publications. The suggested management strategy establishes that the 592.41 T/d, 201.39 T/d should be recycled; 343.54 T/d is organic matter that can be treated by anaerobic digestion generating 185.51 T/d of waste known as digestate; subsequently, composting can be applied generating 46.38 T/d of compost.

1Profesor, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Católica de El Salvador. https://orcid.org/0000-0001-8049-0641 Correo electrónico: mario.lucero@catolica.edu.sv
Recibido: 04/11/2024| Aceptado: 17/02/2025 | Publicado: 15/06/2025
Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

Anaerobic digestion can generate around 36.8 MW of electricity on average. Therefore, it is concluded that the stipulated management strategy allows the waste to be used either in recycling or in energy generation using biogas from anaerobic digestion and through incineration.
Keywords: Solid Waste Management, Anaerobic Digestion, Composting, Incineration.

Introducción

La ciudad de Santa Ana se encuentra ubicada en el occidente de la República de El Salvador, en América Central, a una altura de 665 msnm. Su superficie abarca 408 kilómetros cuadrados. La gestión de residuos en esta ciudad se estableció en la Ley de Medio Ambiente, aprobada en 1998 (Asamblea Legislativa de la República de El Salvador, 2019) e incluye el Reglamento para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (República de El Salvador, 2000). Desde esa fecha comenzó a cambiar la forma de disposición de los residuos; hasta ese momento, ésta se realizaba en su totalidad, 100%, en botaderos a cielo abierto. En 2006, 19% de los municipios realizaba su disposición de residuos en rellenos sanitarios (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2006). En 2019, 100% de los residuos se depositó en los 19 rellenos sanitarios existentes en El Salvador (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021).

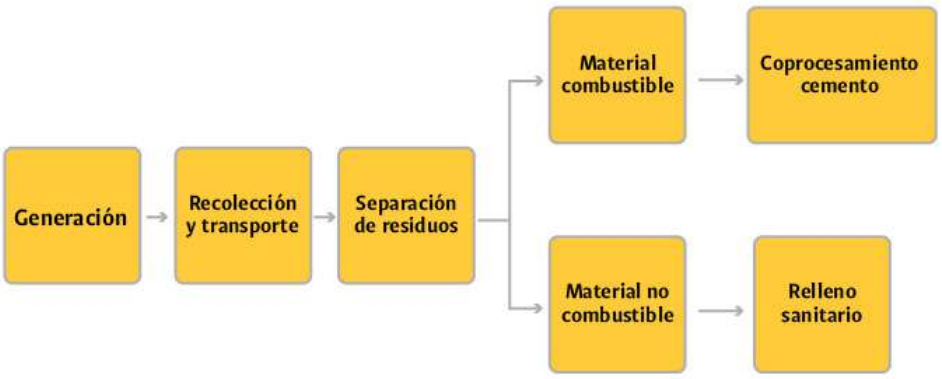
La gestión de residuos en la ciudad se realiza mediante la recolección de los mismos en conjunto; luego, éstos son trasladados al relleno sanitario, donde existe un plan para su separación. Allí se los separa en dos fracciones, lo aprovechable energéticamente para coprocesamiento de cemento y lo no aprovechable. Sin embargo, cuando los residuos son separados en dos fracciones, no se aprovecha totalmente el potencial presente en ellos, ya que el material que podría reciclarse se envía a incineración y la materia orgánica se envía al relleno sanitario.

Esto impide aprovechar el potencial de generación de metano mediante digestión anaerobia, como también del compost, que puede ser usado como abono orgánico. Su uso podría reducir considerablemente la cantidad de residuos que llegan al relleno sanitario, beneficiando a quienes viven en zonas aledañas al mismo. El objetivo de esta investigación es determinar una estrategia de gestión integral basada en flujos de residuos destinados a cada etapa, que considere el tratamiento biológico de la materia orgánica y el tratamiento térmico de los rechazos. Los rechazos lo componen residuos que no pueden ser aprovechados de forma biológica o térmica. A medida que pase el tiempo, la generación de residuos seguirá incrementándose, por lo que la aplicación de una estrategia de este tipo promoverá la reutilización y valorización. A medida que pase el tiempo, la generación de residuos seguirá incrementándose, por lo que la aplicación de una estrategia de este tipo promoverá la reutilización y valorización. La presente investigación se justifica en que, para tener ciudades sostenibles, es importante adecuar la gestión de residuos, de manera de minimizar su impacto en el medio ambiente y en la salud de la población. Esto es de gran importancia debido, debido a los problemas derivados de la gestión de residuos, lo cual genera alternativas viables ambientalmente, al generar subproductos beneficiosos, como es el biogás y el compost, así mismo la capacidad de generación de energía.

La figura 1 muestra la estrategia de gestión de residuos sólidos empleada en la ciudad de Santa Ana. Los residuos generados por las viviendas son recolectados por los camiones compactadores de residuos. En la entrada al relleno sanitario son separados en dos fracciones, una de residuos combustibles y otra de residuos no combustibles. Los primeros son enviados a una cementera para su coprocesamiento en la producción de Clinker. El material no combustible se destina al relleno sanitario.

Dicha estrategia de gestión permite aprovechar el poder calorífico de los residuos; a pesar de ello, se pierde materia prima que podría ser reciclada para la elaboración de nuevos productos. Por otra parte, cuando la materia orgánica termina en el relleno sanitario, no puede ser utilizada para producir metano, gas cuyo poder calorífico es adecuado para generar electricidad.

Figura 1. Estrategia de gestión actual para la ciudad de Santa Ana



La estrategia de gestión de residuos sólidos fue establecida en la Ley de Gestión Integral y Fomento al Reciclaje, que estipula siguiente jerarquía: prevención o reducción, reutilización, reciclaje o valorización y eliminación o disposición final (Asamblea Legislativa de la República de El Salvador, 2019). Algunas alternativas de valorización o tratamiento de los residuos son la digestión anaerobia, el compostaje y la incineración, entre otros.

La digestión anaerobia es un proceso de aprovechamiento de la materia orgánica que utiliza microorganismos anaerobios cuya acción metabólica genera biogás. El biogás está formado principalmente por CO2 y CH4 (metano) (Plugge, 2017); el metano es uno de los gases que posee mayor poder de efecto invernadero (gei) (Howarth et al., 2011), siendo 22 más contaminante que el CO2, por lo que su utilización es importante para el medio ambiente; puede ser utilizado para generar vapor o electricidad.

Algunas tecnologías de digestión anaerobia son las siguientes: proceso dicom, bta, dranco, Kompogas, sebac y Valorga. El proceso dicom comprende el compostaje aerobio y la digestión anaerobia en fase termofílica (Walker et al., 2012). El proceso bta consiste en un pretratamiento hidromecánico y un reactor anaerobio (Hartman y Ahring 2006). El proceso dranco, compostaje anaerobio seco, implica el uso de un reactor vertical anaerobio termofílico (Kothari et al., 2014). El proceso Kompogas se compone de un reactor horizontal termofílico con agitador para mezcla de los residuos (Chynoweth, et al., 1991). El sistema sebac, compostaje anaerobio secuencial en lotes, consiste en tres reactores anaerobios en secuencia (Forster-Carneiro et al., 2004; Chynoweth et al., 1991).

La literatura sobre el tema presente en publicaciones indexadas muestra que las tecnologías escogidas dan lugar a la generación de biogás, razón por la cual fueron seleccionadas. No obstante, también podrían funcionar otras tecnologías; sin embargo, al momento de realizar la investigación, no se contaba con información sobre las mismas recopilada en fuentes indexadas.

La tecnología dicom combina el proceso de compostaje aerobio con la digestión anaerobia termofílica utilizando la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales en un reactor de alta tasa de sólidos (Walker et al., 2012). La tecnología bta emplea un pretratamiento de pulverización del residuo y remoción de aquel no biodegradable. Las etapas del proceso incluyen la acidificación, hidrólisis y metanización por vía anaerobia (Kubler et al., 1994).

El sistema dranco, conversión anaerobia seca, permite la conversión en energía y humus; el proceso consta de una etapa de reducción de tamaño y separación de las diferentes fracciones; luego se lleva a cabo la fermentación para la digestión y por último la deshidratación en una prensa de tornillo (Six et al., 1992). El sistema sebac, compostaje anaerobio secuencial en lotes, se desarrolla en tres etapas: primero, la trituración; luego se digiere en el reactor húmedo por medio de lixiviado y la tercera etapa permite la conversión completa del residuo. (Chynoweth et al., 1991).

El sistema Kompogas involucra un reactor de mezcla completa de eje horizontal. Primero se realiza el pretratamiento para separar los componentes no biodegradables, posteriormente, pasa al digestor para el proceso de digestión anaerobia. El gas extraído es utilizado para generar calor y energía. Luego el residuo, se lleva a cabo la deshidratación y, por último, tiene lugar una etapa de maduración (Wellinger et al., 1997). El sistema Valorga posee un digestor mesofílico semicontinuo de alta tasa de flujo pistón en etapa única. Implica la realización de un pretratamiento con tamices rotatorios, separación manual y separación magnética; el biogás se purifica y el digestato se deshidrata mediante un filtro prensa y se estabiliza en condiciones aerobias (Laclos et al.,1997).

En el campo del compostaje existen diversas tecnologías consolidadas, pero pocas han sido probadas para el uso con digestato. Se optó por considerar la tecnología Biocell para ejemplificar el proceso. Biocell opera con un reactor rectangular mesofílico en lotes con presión y tiempo de detención de 21 días. Dicha tecnología supone el uso de un pretratamiento para separar lo orgánico de lo inorgánico; luego, para desarrollar el proceso, se emplean los digestores; posteriormente se deshidrata y se estabiliza los residuos (Ten, 2000).

Metodología

El área de estudio es la ciudad de Santa Ana, en El Salvador. En ella residía un estimado de 250,318 habitantes en 2023. En esta ciudad se realiza el proceso de separación de residuos antes de su entrada al relleno sanitario. Los materiales con poder calorífico importante son destinados al proceso de cogeneración para producción de cemento, mientras que el resto se envía al relleno sanitario. Desde 1998, El Salvador cuenta con la Ley de Medio Ambiente de la cual surgió el reglamento especial para el Manejo Integral de Desechos Sólidos. En 2019 se creó de Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos y Fomento al Reciclaje. Las fuentes principales de información son: censos de población de El Salvador, pronósticos poblacionales realizados por el Banco Central de Reserva, estadísticas de gestión de residuos del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales y estadísticas de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados. Para los cálculos de crecimiento poblacional y producción per-cápita, los datos se analizarán utilizando el software Statgraphics.

Las etapas de la investigación son las siguientes:

1. Proyección del crecimiento poblacional El crecimiento poblacional se hará utilizando una progresión por los métodos aritmético y geométrico, que dan lugar a las ecuaciones 1 y 2, respectivamente.

(Ecuación 1)

Donde:

Pf: Población futura

Po: Población actual

K: Tasa de crecimiento aritmética

T: Tiempo

(Ecuación 2)

Donde:

Pf: Población futura

Po: Población actual

i: Tasa de crecimiento geométrica

n: Tiempo

Luego, con los datos históricos de Producción Pér-Capita (ppc), se determinará la ppc a futuro, con el objetivo de conocer a cuánto ascenderá la generación de residuos más adelante, de manera de englobar la problemática actual y lo que sucederá cuando la generación de residuos aumente como consecuencia del incremento de la población.

2. Propuesta de líneas de gestión integral de residuos

Para la elaboración de la propuesta, se consideró el objetivo de determinar cuáles son las etapas que involucra el desarrollo de un plan de gestión integral de residuo que priorice el reciclaje y el tratamiento biológico de la materia orgánica, así como el tratamiento térmico de los residuos.

3. Estimación del potencial de generación de biogás por digestión anaerobia y de generación de compost mediante el proceso Biocell.

En esta etapa se estimaron los productos de la digestión con base en coeficientes teóricos encontrados en la literatura. Para ello, se siguieron los pasos que se detallan a continuación:

Obtención de eficiencias de generación y porcentajes de eliminación reportados en investigaciones publicadas en bases de datos indexadas, adoptando las tecnologías dicom, bta, dranco, Kompogas, sebac y Valorga.

Cálculos de productos a obtener, tanto de biogás como de digestato en la digestión anaerobia, basado en las eficiencias y porcentajes reportados por las investigaciones previas con las diversas tecnologías antes mencionadas.

Estimado de generación eléctrica a partir del biogás.

Cálculos para estimar el compost a obtener en la etapa de compostaje utilizando el sistema Biocell.

4. Estimación de potencial de generación de electricidad utilizando incineración de residuos a partir de los rechazos

Obtención de eficiencias de generación y porcentajes de eliminación reportados en investigaciones publicadas en bases de datos indexadas.

Cálculos de potencial energético de los residuos.

Estimación del potencial de generación eléctrica a partir de los rechazos.

Resultados

1. Proyección del crecimiento poblacional y producción per-cápita de la ciudad de Santa Ana

En la tabla 1 se recoge el crecimiento poblacional de la ciudad de Santa Ana y en la figura 2 la tendencia que mostrará su crecimiento. A partir de estos datos se determinó la población futura al año de análisis.

Figura 2. Crecimiento poblacional

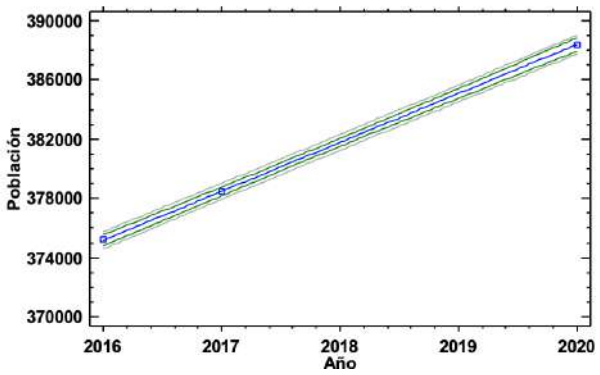


Tabla 1. Población urbana de Santa Ana, años 2016, 2017 y 2020

Año	Población urbana
2016	375,196
2017	374,759
2020	388,401

Fuente: Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (2016, 2017 y 2022).

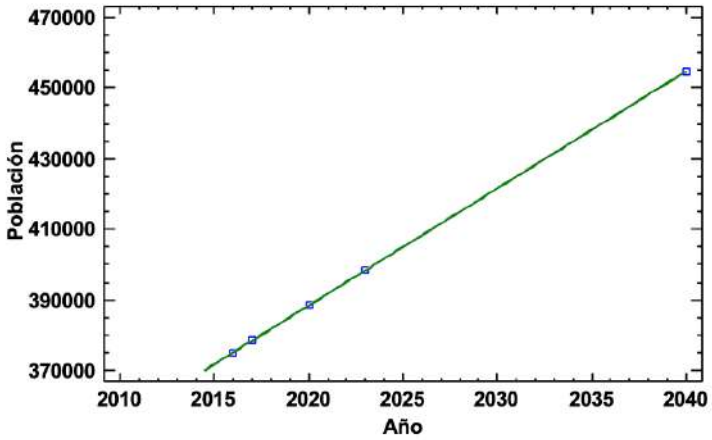
Aplicando las ecuaciones 1 y 2 a los datos históricos se obtienen los datos mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Proyecciones de crecimiento poblacional

Año	Población	Aritmético	Geométrico
2016	375,196		
2017	378,451		
2020	388,401		
2023		398,351	398,613
2040		454,734	461,762

Con base en los datos de población presentados en la tabla 2, el modelo de crecimiento que más se ajusta a la tendencia presentada por los datos históricos es el método aritmético, lo cual se muestra en la figura 3.

Figura 3. Crecimiento poblacional



La Producción Per-Cápita (ppc) para la ciudad de Santa Ana fue 1.01 Kg/Hab en 2006. Para estimar la ppc a futuro, se utilizó la metodología de Jaramillo (2002), estimando un crecimiento de 0.5% anual empleando la ecuación 2 de crecimiento geométrico. Los resultados de la ppc a futuro se muestran en la tabla 3. La cantidad de residuos que se generarán en 2040 será de: 592.31 Ton/d.

Tabla 3. Crecimiento ppc

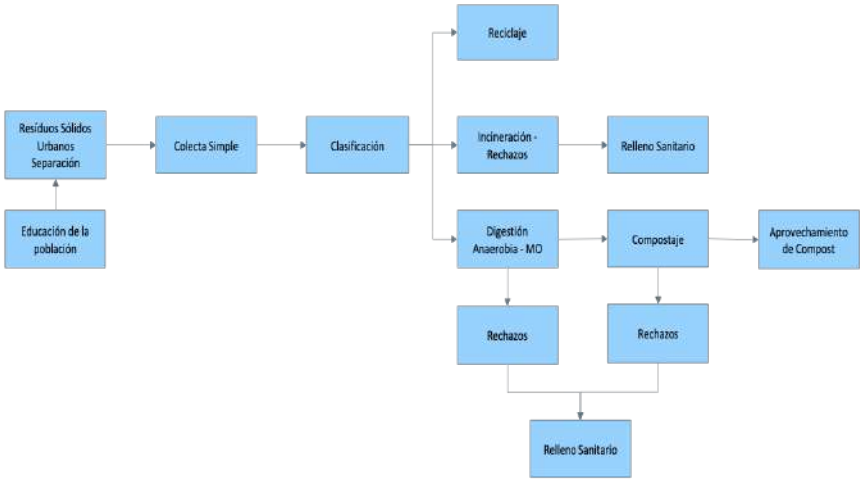
Año	PPC
2006	1.01
2023	1.10
2040	1.30

2. Propuesta de estrategia de gestión de residuos

La estrategia de gestión de gestión de residuos para la ciudad de Santa Ana se presenta en la figura 4 y de forma sintética en la figura 5. En éstas se presenta una alternativa de gestión que propicia el reciclaje de materiales como papel, plástico o cartón, así como la explotación del potencial de generación de metano de la fracción orgánica de los residuos sólidos y del material conocido como rechazo, el cual puede ser aprovechado en la incineración para generar electricidad. La estrategia presentada en la figura 5 plantea separar los residuos en tres fracciones: reciclables en las viviendas, materia orgánica y rechazos, lo cual se identifica con los colores verde, gris y café, respectivamente. En la figura 6 se observan los flujos de residuos con base en la estrategia planteada. La generación de rsu para 2040 se estima en 592.41 T/d. En tanto no existe un estudio de composición gravimétrica para la ciudad, se adoptó la estipulada por Leiva (2002) para la ciudad de San Salvador, determinando 58% para materia orgánica, 34% reciclables y 8% rechazos.

De acuerdo con el flujograma, 343.54 t/d (58%) de rsu corresponden a la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (forsu), la cual puede ser tratada mediante digestión anaerobia; posteriormente, el digestato puede ser estabilizado por compostaje, eliminando un 25% y convirtiendo 25% en compost (46.38 T/d.), generando, además, un residuo para relleno sanitario de 92.76 T/d. En lo que respecta a los residuos reciclables, éstos ascienden a 201.39 T/d, cuyos diversos tipos de componentes deben ir a reciclaje. En el caso de los rechazos, se generan cerca de 47.38 T/d., que pueden incinerarse dando lugar a 11.85 T/d. a ser utilizadas o disponerse en rellenos sanitarios.

Figura 4. Estrategia de gestión sugerida para la ciudad de Santa Ana



3. Cuantificación de productos obtenidos por los procesos de tratamiento biológico, digestión anaerobia y compostaje

Los residuos orgánicos incluidos en la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (forsu) se pretende la aplicación de digestión anaerobia y luego el digestato para un proceso de compostaje. Algunas metodologías no necesitan la estabilización posterior, como es el caso de los procesos dicom y dranco, entre otros, que ya generan un compost estabilizado. Otros procesos de digestión anaerobio requieren la estabilización posterior para que el compost pueda ser utilizado como mejorador del suelo en la agricultura. En la tabla 1, se presenta el volumen de biogás estimado según los diversos tipos de tecnologías aplicadas a partir de un potencial estimado de acuerdo con los diversos tipos de tecnologías.

Figura 5. *Estrategia de gestión sugerida sintética*

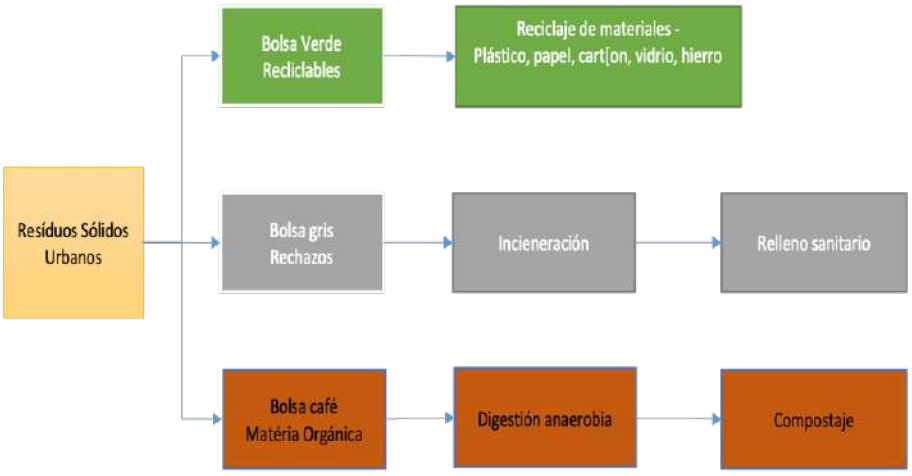
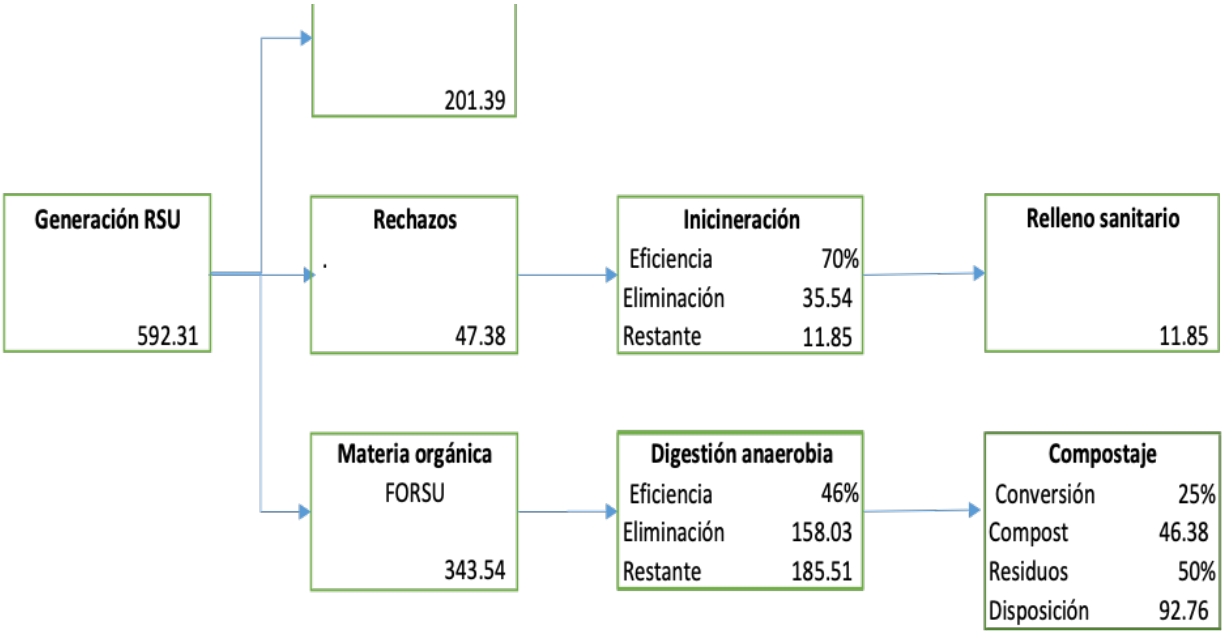


Figura 6. *Flujograma de residuos con base en la estrategia de gestión*



Los tipos de tecnología presentados en la tabla 4, exponiendo datos extraídos de Walker et al. (2012), poseen diferentes capacidades vinculadas a su configuración. Para el cálculo se consideró que los residuos orgánicos poseen 11% de sólidos volátiles (sv) (Lucero, 2017), por lo que aproximadamente 37,789 Kg/d de las 343,539 Kg/d serían sólidos volátiles.

Tabla 4. Estimado de generación de energía eléctrica a partir del biogás

	Tipo de tecnología						
Descripción	DICOM	BTA	DRANCO	Kompogas	SEBAC	Valorga	Unidad
Capacidad	900	3.4	56	200	2.1	3x3 300	
Materia Orgánica	344	344	344	344	344	344	Ton/d
	343539	343,539	343,539	343,539	343,539	343,539	Kg/d
Porcentaje sv	11%	11%	11%	11%	11%	11%	
Cantidad sv	37,789	37,789	37,789	37,789	37,789	37,789	Kg sv/d
Tasa de generación de biogás	0.44	0.39	0.45	0.39	0.34	0.35	m^3 biogás / kg sv
Eficiencia proceso	0.61	0.81	0.81	0.74	0.74	--	
% CH4	0.55	0.73	0.73	0.69	0.64	0.55	
TRH	12	12	18	13	21	20	d

Volumen de biogás generado	16,627	14,738	17,005	14,738	12,848	13,226	
Volumen de CH4 generado	9,145	10,759	12,414	10,095	8,223	7,274	
Poder calorífico Biogás	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	kW/m³
	108,077	95,796	110,534	95,796	83,514	85,971	kw
	108	96	111	96	84	86	MW
Eficiencia estación	34.3%	39%	39%	39%	39%	39%	
	37.1	37.4	43.1	37.4	32.6	33.5	MW

En cuanto a la tasa de generación de metano, cada tecnología muestra una generación de 0.34 a 0.44 metros cúbicos de biogás/Kg sv (Walker et al., 2012). Al multiplicar los sv (37,789 Kg SV) por la tasa de generación para cada tipo de tecnología se constata un potencial de generación de 12,848 a 17,005 metros cúbicos de biogás, de los cuales entre 7,274 a 12,414 metros cúbicos corresponden a gas metano. Considerando un poder calorífico de 6.5 kW/m3 (Cassini, 2003), la generación de electricidad alcanzaría a 84 a 111 MW de energía; si se toma en cuenta la eficiencia del sistema podrían generarse entre 32.6 y 43.1 MW de energía. Esto podría abastecer a unas 4,916 viviendas con la potencia más baja. De acuerdo con Lucero (2016), la ciudad de São Paulo, en Brasil, producía 14,636 t/d en 2014, lo que tenía el potencial de generar entre 54 a 111 MW y de abastecer a 8,151 viviendas.

Algunos procesos dan lugar a compost como material final, que puede ser utilizado en la agricultura. En los procesos en los que el digestato aún necesita estabilización se puede aplicar un compostaje, por ejemplo, el proceso Biocell, un proceso de biooxidación de la materia orgánica. El estimado de generación se presenta en la tabla 5.

Tabla 5. Estimado de generación de compostaje

Tipo reactor	Biocell	Unidad
Generación de digestato	185.51	T/d
	185,511.15	Kg/d
% conversión compost	25%	
Compost	46,377.79	Kg/d
Disposición relleno sanitario	50%	
Disposición relleno sanitario	92,755.58	Kg/d
Tiempo de detención	15-20	d

Fuente: adaptado de Cesaro (2015).

En la etapa anaerobia se generan aproximadamente 185.51 t/d de digestato, de lo cuales 25% de convierte en compost, 25% se elimina y 50% se separa para relleno sanitario. Por lo tanto, se generan 46.38 t/d de compost y 92.76 t/d de residuos para relleno sanitario.

4. Cuantificación de productos obtenidos por los procesos de tratamiento térmico por incineración

Tabla 6. Estimado de generación

	Escenario 2	Unidad
Rechazos	47.38	T/d
	47,384.71	Kg/d
Poder calorífico	*2778	Kcal/Kg
Calorías	131,634,733.12	Kcal/d
	5,484,780.55	Kcal/h
1 MW =	859,845.23	Kcal/h
	6.38	MW
Eficiencia	30%	
	1.91	MW
Cenizas	25%	
	11,846.18	Kg/d
	11.85	T/d

Fuente: adaptado de Tissot (2014); Tchobanoglous et al. (1994).

Según el plan de gestión sugerido, el proceso de incineración sólo se aplica a los residuos catalogados como rechazos. Éstos ascienden a 47.38 T/d y generan 1.91 MW de energía y 11.85 T/d de cenizas, como se muestra en la tabla 6. La electricidad producida puede abastecer a 1,913 viviendas. De las 47.38 T/d sólo 11.85 T/d se destinan a relleno sanitario, lo cual reduce en 75% el uso de rellenos.

Conclusiones

La aplicación de la gestión integral de residuos sólidos en la ciudad de Santa Ana reduce los residuos destinados a relleno sanitario en 82% aproximadamente, haciendo llegar a éste sólo cenizas y residuos de composta, lo que permite el aprovechamiento energético de los residuos.

La gestión de residuos separados en tres fracciones hace que éstos puedan ser tratados adecuadamente, haciendo posible recolectar el material reciclable con mejor calidad, favoreciendo su reciclaje y ayudando a mejorar el ciclo de vida de los materiales, lo que previene el uso de nuevas materias primas para desarrollar un nuevo producto.

La materia orgánica puede ser aprovechada para la generación de biogás por el proceso de digestión anaerobia. Su potencial de generación de biogás y, por ende, de electricidad, es de alrededor de 36.8 MW; el material resultante puede aprovecharse como compost, dependiendo del tipo de tecnología utilizada o aplicando el compostaje, lo que genera un valor agregado.

Los rechazos pueden ser aprovechados mediante el proceso de incineración para generar 1.91 MW de electricidad, con capacidad de abastecer a más de 1,913 viviendas.

Referencias

Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillado (2017). Boletín Estadístico 2017. https://www.anda.gob.sv/index.php/logros-y-memorias-2/#

Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (2022). Boletín Estadístico 2020. https://www.anda.gob.sv/index.php/logros-y-memorias-2/#

Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (2016). Boletín Estadístico 2016. https://www.anda.gob.sv/index.php/logros-y-memorias-2/#

Asamblea Legislativa de la República de El Salvador (2019). Ley de Gestión Integral de Residuos y Fomento al Reciclaje. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2, 21. https://cidoc.marn.gob.sv/documentos/decreto-no-527-ley-de-gestion-integral-de-residuos-y-fomento-al-reciclaje/

Cassini, S. (2003). Residuos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. abes. http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/ProsabStulio.pdf

Cesaro, A., Russo, L., y Belgiorno, V. (2015). Combined anaerobic/aerobic treatment of ofmsw: Performance evaluation using mass balances. Chemical Engineering Journal, 267(2015), 16-24. https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.12.110

Chynoweth, D. P., Bosch, G., Earle, J. F. K., Legrand, R., y Liu, K. (1991). A novel process for anaerobic composting of municipal solid waste. Applied Biochemistry and Biotechnology, 28-29(1), 421-432. https://doi.org/10.1007/BF02922622

Forster-Carneiro, T., Fernández, L. A., Pérez, M., Romero, L. I., y Álvarez, C. J. (2004). Optimization of sebac start up phase of municipal solid waste anaerobic digestion. Chemical and Biochemical Engineering Quarterly, 18(4), 429-439.

Jaramillo, J. (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales: una solución para la disposición final de residuos sólidos municipales en pequeñas poblaciones. https://iris.paho.org/handle/10665.2/55275

Hartmann, H., y Ahring, B. K. (2006). Strategies for the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: An overview. Water Science and Technology, 53(8), 7-22. https://doi.org/10.2166/wst.2006.231

Howarth, R. W., Santoro, R., y Ingraffea, A. (2011). Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations. Climatic Change, 106(4), 679-690. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0061-5

Karagiannidis, A., y Perkoulidis, G. (2009). A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion for energy recovery of the organic fraction of municipal solid wastes. Bioresource Technology, 100(8), 2355-2360. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.033

Kothari, R., Pandey, A. K., Kumar, S., Tyagi, V. V., y Tyagi, S. K. (2014). Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39, 174-195. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.011

Kübler, H., y Schertler, C. (1994). Three-phase anaerobic digestion of organics wastes. Wat. Sci. Tech., 30(12), 367-374. http://www.iwaponline.com/wst/03012/0367/030120367.pdf

Laclos, H., Desbois, S., y Saint-Joly, C. (1997). Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste. Water Science & Technology, 36(6-7), 457-462. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1983)109:5(1148)

Leiva, C. (2002). Consideraciones generales sobre la Gestión de Residuos Sólidos en El Salvador. UFG Editores,. http://hdl.handle.net/11592/8350

Lucero, M., y Contrera, R. C. (2016). Proposta de modificação do plano de gestão dos resíduos sólidos domiciliares da cidade de São Paulo. marzo 2022. http://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/article/view/41

Lucero, M., y Contrera, R. C. (2017). Determinação do potencial energético da fração orgânica dos resíduos sólidos produzidos na companhia de entrepostos e armazéns gerais de São Paulo, ceagesp. 8° Forum Internacional de Resíduos Sólidos, 8. http://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/article/view/41/32

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2021). Anuario Estadístico 2019. https://cidoc.ambiente.gob.sv/documentos/anuario-estadistico-2019/

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2006). Segundo Censo Nacional De Desechos Sólidos Municipales. https://cidoc.marn.gob.sv/por-categoria/?cat=informes-nacionales#

Plugge, C. M. (2017). Biogás. Microbial Biotechnology, 10(5), 1128-1130. https://doi.org/10.1111/1751-7915.12854

República de El Salvador (2000). Reglamento especial sobre el Manejo Integral de los Desechos Sólidos y sus anexos. https://cidoc.ambiente.gob.sv/documentos/reglamento-especial-sobre-el-manejo-integral-de-los-desechos-solidos-y-sus-anexos/

Six, W., y De Baere, L. (1992). Dry anaerobic conversion of municipal solid waste by means of the Dranco process. Water Science and Technology, 25(7), 295-300.

Tchobanoglous, G., Thiesen, H., y Vigil, S. (1994). Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGraw-Hill.

Ten Brummeler, E. (2000). Full scale experience with the BIOCEL process. Water Science and Technology, 41(3), 299-304.

Tissot, M. (2014). Recuperação energética de resíduos por meio de combustível derivado de resíduo - cdr conferência waste to energy 2014. En Conferência waste to energy 2014. https://docplayer.com.br/13878384-Viabilidade-ambiental-e-economica-da-recuperacao-energetica-de-residuos-por-meio-de-combustivel-derivado-de-residuo-cdr.html

Walker, L., Cord-Ruwisch, R., y Sciberras, S. (2012). Performance of a commercial-scale DiCOMTM demonstration facility treating mixed municipal solid waste in comparison with laboratory-scale data. Bioresource Technology, 126, 404-411. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.079

Wellinger, A., Wyder, K., y Metzler, A. E. (1993). Kompogas - A new system for the anaerobic treatment of source separated waste. Water Science and Technology, 27(2), 153-158.

Derechos de Autor© 2025 Lucero Culi, Mario José



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.