

El dilema del azúcar

*De la vinaza a la
economía circular*



Karlita Lady Diane Chun Orbegozo, Anthony Juan Ortiz Vargas,
Alejandro Wilber Padilla Sevillano, Pedro Miguel Vásquez Mendoza,
Segundo Juan Saldaña Saavedra, Wilson Reyes Lázaro,
María Nelly Vásquez Valles



El dilema del azúcar

De la vinaza a la economía circular

Karlita Lady Diane Chun Orbegozo, Anthony Juan Ortiz Vargas,
Alejandro Wilber Padilla Sevillano, Pedro Miguel Vásquez Mendoza,
Segundo Juan Saldaña Saavedra, Wilson Reyes Lázaro,
María Nelly Vásquez Valles

Quito, Ecuador

| 2025 |

The Sugar Dilemma

From Vinasse to the Circular Economy

O dilema do açúcar

Da vinhaça à economia circular

Religación Press

[Ideas desde el Sur Global]

Equipo Editorial

Editorial team

Ana B. Benalcázar

Editora Jefe / Editor in Chief

Felipe Carrión

Director de Comunicación / Scientific Communication Director

Melissa Díaz

Coordinadora Editorial / Editorial Coordinator

Sarahi Licango Rojas

Asistente Editorial / Editorial Assistant

Consejo Editorial

Editorial Board

Jean-Arsène Yao

Dilrabo Keldiyorovna Bakhranova

Fabiana Parra

Mateus Gamba Torres

Siti Mistima Maat

Nikoleta Zampaki

Silvina Sosa

Religación Press, es parte del fondo editorial del Centro de Investigaciones CICSHAL-

RELIGACIÓN | Religación Press, is part of the editorial collection of the CICSHAL-

RELIGACIÓN Research Center |

Diseño, diagramación y portada | Design, layout and cover: Religación Press.

CP 170515, Quito, Ecuador. América del Sur.

Correo electrónico | E-mail: press@religion.com

www.religacion.com

Disponible para su descarga gratuita en | Available for free download at
<https://press.religacion.com>

Este título se publica bajo una licencia de Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)
This title is published under an Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license.



Derechos de autor | Copyright: Religación Press, Karlita Lady Diane Chun Orbegozo, Anthony Juan Ortiz Vargas, Alejandro Wilber Padilla Sevillano, Pedro Miguel Vásquez Mendoza, Segundo Juan Saldaña Saavedra, Wilson Reyes Lázaro, María Nelly Vásquez Valles

Primera Edición | First Edition: 2025

Editorial | Publisher: Religación Press

Materia Dewey | Dewey Subject: 338.1 - Agricultura

Clasificación Thema | Thema Subject Categories: TQK - Control de la contaminación | KND - Industrias manufactureras | KJJ - Empresa y medio ambiente, estrategias verdes de negocio

BISAC: TEC010030

Público objetivo | Target audience: Profesional / Académico | Professional / Academic

Colección | Collection: Estudios Ambientales

Soporte| Format: PDF / Digital

Publicación | Publication date: 2025-11-14

ISBN: 978-9942-561-95-4

Título: El dilema del azúcar. De la vinaza a la economía circular

Nota obra derivada: El libro retoma y amplía, mediante el trabajo colaborativo de un grupo de investigadores, los hallazgos y aportes presentados en la tesis original, enriqueciendo su contenido con nuevos enfoques, análisis y perspectivas que profundizan en los temas abordados en “Influencia del pH y concentración de ozono en la eliminación del DQO presente en residuos de la industria azucarera – Vinaza” presentada ante la Universidad Nacional de Trujillo por Karlita Lady Diane Chun Orbegozo, Anthony Juan Ortiz Vargas, en 2024.

Note: The book takes up and expands, through the collaborative work of a group of researchers, the findings and contributions presented in the original dissertation, enriching its content with new approaches, analyses and perspectives that deepen the topics addressed in “Influencia del pH y concentración de ozono en la eliminación del DQO presente en residuos de la industria azucarera – Vinaza” presented to the Universidad Nacional de Trujillo by Karlita Lady Diane Chun Orbegozo, Anthony Juan Ortiz Vargas, in 2024.

[APA 7]

Chun Orbegozo, K. L. D., Ortiz Vargas, A. J., Padilla Sevillano, A. W., Vásquez Mendoza, P. M., Saldaña Saavedra, S. J., Reyes Lázaro, W., y Vásquez Valles, M. N. (2025). *El dilema del azúcar. De la vinaza a la economía circular*. Religación Press. <https://doi.org/10.46652/ReligacionPress.352>

Revisión por pares

La presente obra fue sometida a un proceso de evaluación mediante el sistema de dictaminación por pares externos bajo la modalidad doble ciego. En virtud de este procedimiento, la investigación que se desarrolla en este libro ha sido avalada por expertos en la materia, quienes realizaron una valoración objetiva basada en criterios científicos, asegurando con ello la rigurosidad académica y la consistencia metodológica del estudio.

Peer Review

This work was subjected to an evaluation process by means of a double-blind peer review system. By virtue of this procedure, the research developed in this book has been endorsed by experts in the field, who made an objective evaluation based on scientific criteria, thus ensuring the academic rigor and methodological consistency of the study.

Sobre los autores

About the authors

Karlita Lady Diane Chun Orbegozo

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú
kchun@unitru.edu.pe

Anthony Juan Ortiz Vargas

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú
aortizv@unitru.edu.pe

Alejandro Wilber Padilla Sevillano

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú
<https://orcid.org/0000-0003-4764-4068>
apadilla@unitru.edu.pe
alexandropaddi@gmail.com

Pedro Miguel Vásquez Mendoza

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú
<https://orcid.org/0009-0003-0485-197X>
pvasquezm@unitru.edu.pe
pedromiguelvasquezmendoza@gmail.com

Segundo Juan Saldaña Saavedra

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú
<https://orcid.org/0000-0002-1338-2015>
ssaldana@unitru.edu.pe
jhonsaldanasavedra@gmail.com

Wilson Reyes Lázaro

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú
<https://orcid.org/0000-0002-2702-0269>
wreyez@unitru.edu.pe
Wirela54@gmail.com

María Nelly Vásquez Valles

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú
<https://orcid.org/0000-0002-1087-0179>
mvasquezv@unitru.edu.pe
marianellyvasquezvalles@gmail.com

Resumen

Este libro aborda la paradoja ambiental de la industria azucarera: mientras produce un edulcorante esencial, genera la vinaza, uno de los residuos líquidos más contaminantes. La obra explora el impacto devastador de este subproducto en ecosistemas acuáticos y suelos, revelando cómo las prácticas actuales de disposición simplemente trasladan el problema entre compartimentos ambientales. A través de un análisis de tecnologías emergentes, se presentan soluciones innovadoras como la ozonización catalítica y sistemas de tratamiento integrados que transforman este pasivo ambiental en oportunidad de valorización. El libro propone un camino hacia la economía circular, donde lo que hoy es residuo pueda convertirse en recurso, cerrando los ciclos de materiales en la industria sucroalcoholera.

Palabras clave:

Vinaza; Ozonización; Contaminación; Remediación; Impacto ambiental.

Abstract

Behind the sweetness of sugar lies a toxic legacy: vinasse. This residue from alcohol production is a global-scale pollutant that poisons soils and water sources, endangering ecosystems and communities. Traditional solutions have proven insufficient or misleading. This book presents urgent research exploring a promising alternative: the power of ozone. Dive into the world of advanced oxidation treatments, where ozonation, alone or combined with catalysts and other technologies, emerges as a powerful weapon to break down this complex pollution. An essential work analyzing the feasibility of transforming this environmental liability into an opportunity for a cleaner, more sustainable industry.

Keywords:

Vinasse; Ozonation; Pollution; Remediation; Environmental Impact.

Resumo

Este livro aborda o paradoxo ambiental da indústria açucareira: ao mesmo tempo que produz um adoçante essencial, gera a vinhaça, um dos resíduos líquidos mais contaminantes. A obra explora o impacto devastador deste subproduto em ecossistemas aquáticos e solos, revelando como as práticas atuais de disposição simplesmente transferem o problema entre compartimentos ambientais. Por meio de uma análise de tecnologias emergentes, são apresentadas soluções inovadoras como a ozonização catalítica e sistemas de tratamento integrados que transformam este passivo ambiental em oportunidade de valorização. O livro propõe um caminho para a economia circular, onde o que hoje é resíduo pode se converter em recurso, fechando os ciclos de materiais na indústria sucroalcooleira.

Palavras-chave:

Vinhoto; Ozonização; Poluição; Remediação; Impacto ambiental.

CONTENIDO

Revisión por pares	6
Peer Review	6
Sobre los autores	8
About the authors	8
Resumen	10
Abstract	10
Resumo	11
Prólogo	16
Capítulo 1	
La Paradoja Ambiental de la Industria Azucarera	20
De la Contaminación a la Sostenibilidad	21
La Naturaleza Compleja del Impacto Contaminante	21
Tecnologías Emergentes para un Desafío Complejo	22
Hacia una Gestión Integral y Sostenible	24
Capítulo 2	
La Revolución del Ozono en el Tratamiento de Efluentes Industriales	28
Un Enfoque en la Industria Azucarera	29
El Proceso de Fermentación: Complejidades Bioquímicas y Desafíos Operativos	30
La Vinaza como Desafío Ambiental: Caracterización y Impactos	31
Tecnologías de Oxidación Avanzada: Fundamentos y Aplicaciones	34
Planteamiento del Problema de Investigación: Enfoque y Metodología	39
Capítulo 3	
Un Enfoque Sistemático para el Tratamiento de Vinaza Mediante Ozonización	43
Diseño y Configuración Experimental	44
Procedimientos Operativos y Esquema Experimental	45
Análisis de Resultados y Evaluación Estadística	48
Capítulo 4	
Eficiencia del Tratamiento de Vinaza Mediante Ozonización	52
Caracterización Inicial y Parámetros de Referencia	53
Eficiencia de Remoción de DQO: Patrones y Tendencias	54
Evaluación de la efectividad en condiciones neutras:	57
Porcentaje de remoción a pH 9	60

Porcentaje de remoción promedio	63
Gráfica resumen de porcentaje de remoción de DQO	65
Análisis Estadístico y Validación de Resultados	66
Capítulo 5	
Hacia una ozonización optimizada: síntesis de condiciones y perspectivas	70
Factores clave en la remoción de DQO y color en el tratamiento de vinazas	71
De la remediación a la valorización: integrando parámetros operativos y catalizadores	71
Conclusiones	72
Validación Experimental y Fundamentos Químicos del Proceso	72
Optimización de Parámetros Operativos y Potencial de Escalamiento	73
Líneas Futuras de Investigación y Desarrollo Tecnológico	74
Referencias	77

Tablas

Tabla 1. Caracterización de la Vinaza cruda de Caña de Azúcar	32
Tabla 2. Categorización de las fases operativas en la cadena de purificación de efluentes.	39
Tabla 3. Elementos variables del sistema en observación.	46
Tabla 4. Disposición sistemática de factores e interacciones bajo estudio.	47
Tabla 5. Parámetros de Carga Orgánica: DQO Inicial y Post-Dilución	53
Tabla 6. Resultados de la primera réplica para la reducción de DQO a pH 5.	54
Tabla 7. Resultados de la segunda réplica para la reducción de DQO a pH 5.	55
Tabla 8. Resultados de la tercera réplica para la reducción de DQO a pH 5.	56
Tabla 9. Resultados de la primera réplica para la reducción de DQO a pH 7.	57
Figura 8. Patrón de Eliminación de DQO en Medio Ácido	58
Tabla 12. Resultados de la primera réplica para la reducción de DQO a pH 7.	60
Tabla 13. Segunda Réplica: Reducción de DQO a pH 9	61
Tabla 14. Tercera Réplica: Reducción de DQO a pH 9	62
Tabla 15. Resultados de remoción de DQO a pH 5 – promedio	63
Tabla 16. Resultados de remoción de DQO a pH 7 – Promedio	64
Tabla 17. Resultados de remoción de DQO a pH 9 – Promedio	65
Tabla 18. Análisis de varianza en STATGRAPHICS	67

Figuras

Figura 1. Diagrama de Flujo: Producción de Etanol desde Caña de Azúcar y Maíz	29
Figura 2. Diagrama de Flujo. Producción de Etanol desde Jugo de Caña	31
Figura 3. Poza de vinaza	32
Figura 4. Representación estructural del proceso metodológico desplegado en el trabajo experimental.	48
Figura 5. Cinética de Reducción de DQO en Medio Ácido	55
Figura 6. Resultados de la segunda réplica para la reducción de DQO a pH 5.	56
Figura 7. Patrón consolidado de eliminación en medio ácido: tercera y última réplica de la reducción de DQO a pH 5.	57
Figura 10. Curva de remoción a pH 7 – III Réplica	59
Figura 11. Patrón de Eliminación de DQO en Medio Alcalino	60
Figura 12. Curva de remoción a pH 9 – II Réplica	61
Figura 13. Patrón de Eliminación: Tercera Réplica de DQO a pH 9	62
Figura 14. Patrón de Eliminación: Curva Promedio de DQO a pH 5	63
Figura 15. Curva de remoción a pH 7 –Promedio	64
Figura 16. Curva de remoción a pH 9 – Promedio	65
Figura 17. Representación de los porcentajes de remoción de DQO a diferentes pH	66

Prólogo

La industria azucarera se encuentra ante una encrucijada histórica que define no solo su futuro económico, sino su misma legitimidad social y ambiental. "El Dilema del Azúcar: De la Vinaza a la Economía Circular" surge como una respuesta urgente a esta disyuntiva, explorando los caminos que podrían transformar uno de los mayores desafíos ambientales del sector en una oportunidad de reinención sostenible.

Nos enfrentamos a una paradoja profundamente inquietante: la misma industria que endulza nuestras mesas y impulsa nuestros vehículos con biocombustibles genera simultáneamente la vinaza, un efluente de poder contaminante tan extraordinario que por cada litro de etanol producido emergen entre doce y quince litros de este residuo líquido. La magnitud del problema adquiere dimensiones alarmantes cuando contemplamos su impacto en ecosistemas acuáticos y terrestres, particularmente en aquellas regiones donde la producción sucroalcohólica constituye el pilar de economías enteras.

La composición química de la vinaza revela la naturaleza compleja de este desafío. Con una demanda química de oxígeno que oscila entre 60 y 70 g/L, este subproducto no solo resiste los procesos naturales de degradación, sino que desencadena consecuencias ambientales en cascada cuando se gestiona inadecuadamente. La práctica extendida de la fertirrigación con vinaza, lejos de constituir una solución, representa apenas un paliativo que traslada el problema entre compartimentos ambientales, generando desde salinización progresiva de suelos hasta lixiviación de metales pesados hacia acuíferos subterráneos.

Frente a este panorama, la investigación científica ha emprendido una búsqueda incansable de soluciones tecnológicas que permitan

tan romper este círculo vicioso. Los procesos de oxidación avanzada, particularmente la ozonización, emergen como alternativas prometedoras no por su capacidad de ofrecer soluciones simples, sino por su potencial para integrarse en sistemas de tratamiento multimodal. Los estudios aquí recopilados demuestran que la ozonización catalítica, cuando se combina con otros procesos y se optimiza mediante parámetros operativos precisos, puede alcanzar eficiencias de reducción de DQO cercanas al 90%, transformando radicalmente las perspectivas de tratamiento.

Sin embargo, el verdadero avance conceptual que este libro propone trasciende la mera remediación. La evidencia presentada por investigadores como Reis en Brasil, Aguiar en sus experimentos con catálisis heterogénea, y Blas en sus sistemas integrados de electrocoagulación y ozonificación, apunta hacia un cambio de paradigma fundamental: la vinaza debe dejar de conceptualizarse como un residuo para entenderse como un recurso potencial dentro de ciclos productivos circulares.

La optimización de estos procesos requiere superar importantes desafíos técnicos y económicos. El consumo energético de la ozonización, la necesidad de diluciones significativas, y la dependencia de condiciones operativas específicas como el pH alcalino, constituyen obstáculos que demandan investigación continua y desarrollo tecnológico. No obstante, los resultados experimentales aquí documentados sugieren que estas limitaciones pueden superarse mediante la integración sinérgica de tecnologías complementarias y el diseño inteligente de secuencias de tratamiento.

Este libro se estructura como un viaje desde la comprensión fundamental del problema hacia la exploración de soluciones tecnológicamente sofisticadas y conceptualmente innovadoras. Cada capítulo representa un peldaño en esta escalera conceptual que nos lleva desde la caracterización básica de la vinaza hasta las propuestas más avanzadas de valorización integral. El lector encontrará no solo un análisis técnico riguroso, sino también una reflexión profunda sobre

las implicaciones económicas, sociales y ambientales de la transición hacia modelos circulares en la industria azucarera.

Más allá de su valor académico, esta obra aspira a convertirse en un instrumento de transformación práctica para ingenieros, gestores ambientales, diseñadores de políticas y todos aquellos actores comprometidos con la construcción de una industria azucarera ambientalmente responsable y económicamente viable. Los principios de economía circular aquí expuestos no representan una utopía inalcanzable, sino un horizonte tangible hacia el cual pueden orientarse las decisiones tecnológicas, las inversiones industriales y las políticas públicas.

Al concluir esta lectura, esperamos que el lector no solo haya ampliado su comprensión técnica del desafío que representa la vinaza, sino que haya adquirido una visión esperanzadora sobre las posibilidades de transformación profunda que se abren ante nosotros. El dilema del azúcar, lejos de constituir una sentencia irrevocable, representa una invitación a la innovación, la creatividad tecnológica y el compromiso con un futuro donde lo que hoy consideramos desecho se convierta en el fundamento de nuevos ciclos de valor y sostenibilidad.

Capítulo 1

La Paradoja Ambiental de la Industria Azucarera

De la Contaminación a la Sostenibilidad

La industria azucarera global enfrenta una paradoja significativa: mientras produce un edulcorante esencial para la alimentación humana, genera simultáneamente uno de los residuos industriales más problemáticos desde la perspectiva ambiental. La vinaza, también conocida como mosto de destilería, constituye un efluente de elevado poder contaminante que emerge como subproducto inevitable durante la fermentación de la miel final de caña de azúcar para obtener alcohol etílico (Ibarra et al., 2019). Este residuo orgánico líquido representa un desafío ambiental de proporciones globales, particularmente en regiones con una importante producción sucro-alcoholera como América Latina y el Sudeste Asiático, donde su disposición inadecuada genera efectos deletéreos sobre ecosistemas terrestres y acuáticos. La magnitud del problema se intensifica cuando consideramos que por cada litro de etanol producido se generan volúmenes sustanciales de vinaza residual, estableciendo una relación directa entre la producción de biocombustibles y la generación de pasivos ambientales (Ibarra y Leon, 2018). Esta relación paradójica entre producción energética y degradación ambiental requiere soluciones innovadoras que permitan transitar hacia modelos de economía circular dentro de la industria.

La Naturaleza Compleja del Impacto Contaminante

La composición química particular de la vinaza explica su elevado potencial contaminante y los desafíos que presenta para su tratamiento adecuado. Estudios especializados han determinado que este efluente contiene concentraciones significativas de materia orgánica, potasio, calcio, junto con cantidades moderadas de nitrógeno y fósforo (Orlando y Leme, 1984). Esta combinación de componentes genera una demanda química de oxígeno extremadamente elevada, situándose entre 60 y 70 g/L, lo que dificulta enormemente los procesos naturales de degradación en los cuerpos de agua recep-

tores (Ibarra y Leon, 2018; como se citó en Gómez, 1987). Cuando se considera que por cada litro de etanol producido a partir de miel final se obtienen entre 12 y 15 litros de vinaza residual, la magnitud del desafío ambiental se vuelve evidente, particularmente en países con temporadas de zafra extensas y volúmenes de producción significativos. El impacto se manifiesta a múltiples niveles: la descarga directa en cursos de agua genera anoxia y eutrofización, mientras que la aplicación no controlada en suelos agrícolas desencadena procesos de degradación edáfica de considerable gravedad.

La aplicación directa de vinaza en suelos agrícolas, práctica común en muchas regiones productoras, conlleva una serie de consecuencias negativas que frecuentemente se subestiman en las evaluaciones de impacto ambiental. Cristofoletti et al. (2013) advierten que esta práctica puede causar salinización progresiva de los suelos, lixiviación de metales pesados hacia aguas subterráneas, alteraciones significativas en el balance nutricional del suelo -especialmente en relación con el manganeso-, reducción de la alcalinidad, pérdida de cultivos sensibles, incremento de fitotoxicidad y generación de olores desagradables que afectan a comunidades aledañas. La fertirrigación con vinaza, aunque ampliamente utilizada como alternativa de disposición, frecuentemente opera como una práctica paliativa que crea una falsa percepción de solución al problema de fondo (Ibarra et al., 2019). Esta aproximación no aborda la naturaleza estructural del desafío ambiental, sino que simplemente traslada el problema a otro comportamiento ambiental, evidenciando la necesidad de desarrollar tecnologías de tratamiento que permitan una gestión integral verdaderamente sostenible.

Tecnologías Emergentes para un Desafío Complejo

Ante la insuficiencia de los métodos convencionales de tratamiento, la investigación científica ha explorado diversas alternativas tecnológicas para abordar el desafío que representa la gestión de la

vinaza. Entre estas alternativas, los procesos de oxidación avanzada han emergido como opciones particularmente prometedoras debido a su capacidad para degradar compuestos orgánicos recalcitrantes mediante la generación de radicales hidroxilo. Medina (2019) planteó el estudio de la ozonización como tratamiento complementario para la reducción de la carga orgánica, implementando una investigación descriptiva aplicada que analizó muestras de diversos ingenios azucareros. Aunque los resultados en cuanto a reducción de DQO no fueron significativos con los equipos utilizados, se demostró la efectividad del proceso para disminuir el color de las vinazas diluidas hasta en un 75%, lo que sugiere aplicaciones específicas para este tratamiento en esquemas de depuración por etapas. Esta aproximación metodológica establece las bases para el desarrollo de sistemas de tratamiento secuenciales que combinen múltiples tecnologías según las características específicas de cada corriente residual.

La combinación de ozonización con otros procesos de tratamiento representa una línea de investigación particularmente fructífera que ha generado resultados alentadores en contextos experimentales. Reis et al. (2019) propusieron en Brasil un esquema de tratamiento que integra ozonización seguida de procesos microbianos, logrando reducciones significativas en compuestos fenólicos y una decoloración progresiva de la vinaza en función del tiempo de exposición. La optimización de parámetros operativos como el pH (ajustado a 4.5 como tratamiento previo), el tiempo de retención y la dosificación de ozono demostró ser fundamental para maximizar la eficiencia del proceso. De manera complementaria, Aguiar et al. (2021) exploraron el efecto de la ozonización convencional asistida con catalizadores como carbón activado, Fe^{3+} y Mn^{2+} , documentando reducciones de DQO que alcanzaron hasta 89.7% bajo condiciones operativas específicas. Estos hallazgos sugieren que la catálisis heterogénea puede mejorar sustancialmente la eficiencia de los procesos de ozonización, reduciendo simultáneamente los costos operativos asociados con el consumo de energía y reactivos.

La transferibilidad de estas tecnologías a otros contextos industriales ha sido evaluada en diversos estudios que examinan su aplicabilidad a efluentes con características similares. Hernández et al. (2019) implementaron ozonización catalítica para el tratamiento de aguas residuales de estaciones de servicio, combinando ozono con magnetita y logrando una reducción del 74,76% en DQO, mientras destacaban la influencia determinante del pH en la efectividad del proceso. De manera paralela, Fernández y Suca (2020) desarrollaron un sistema híbrido que integraba tratamiento primario con especies vegetales (*Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes*) seguido de ozonización como tratamiento secundario para mejorar la calidad de efluentes de la industria plástica, cumpliendo con los límites máximos permisibles establecidos en la normativa nacional. Estos estudios demuestran la versatilidad de los procesos de ozonización y su potencial integración en esquemas de tratamiento multimodal adaptados a las particularidades de cada corriente residual.

Hacia una Gestión Integral y Sostenible

La evidencia científica acumulada sugiere que ninguna tecnología individual constituye por sí misma una solución completa al desafío que representa la gestión de la vinaza. Por el contrario, se requiere el desarrollo de sistemas integrados que combinen múltiples procesos de tratamiento en secuencias diseñadas específicamente para las características particulares de cada contexto productivo. Blas y Conislla (2021) plantearon la combinación de electrocoagulación y ozonificación, logrando remociones de turbidez entre 58% y 93%, y eficiencias en la reducción de DQO que variaron entre 48,16% y 83,7% según las condiciones operativas. Estos resultados refuerzan la noción de que la sinergia entre diferentes tecnologías puede superar las limitaciones de cada proceso individual, ofreciendo eficiencias globales superiores a las alcanzables mediante aproximaciones unimodales.

Las innovaciones tecnológicas recientes apuntan hacia la optimización de los procesos de ozonización mediante estrategias que mejoren la transferencia de masa y la eficiencia energética. García y Meza (2021) exploraron la aplicación combinada de microburbujas, ozonización, ultrasonido y plasma, concluyendo que aunque la aplicación de ozono para degradar compuestos orgánicos sintéticos es altamente eficiente, el consumo energético asociado representa una limitación significativa. La incorporación de catalizadores que aceleren las cinéticas de reacción y la implementación de sistemas de inyección mediante microburbujas que mejoren la reactividad emergen como estrategias promisorias para superar estas limitaciones. De manera complementaria, estudios como los de Alfaro y Aranda (2022) y Apaza y Laiza (2022) han demostrado la importancia crítica del control preciso de parámetros operativos como el pH, la temperatura y el tiempo de reacción para maximizar la eficiencia de los procesos de ozonización en el tratamiento de efluentes industriales complejos.

La transición hacia una gestión sostenible de la vinaza requiere necesariamente la integración de soluciones tecnológicas innovadoras dentro de un marco conceptual más amplio que incorpore principios de economía circular y valorización de residuos. Las investigaciones revisadas sugieren que los procesos de ozonización, particularmente cuando se combinan con otras tecnologías y se optimizan mediante el uso de catalizadores, representan herramientas poderosas para transformar este pasivo ambiental en una oportunidad de desarrollo sostenible. La implementación exitosa de estas soluciones a escala industrial dependerá de la capacidad para adaptarlas a las condiciones específicas de cada contexto productivo, considerando tanto viabilidad técnica como económica. El camino hacia una industria azucarera ambientalmente responsable pasa inevitablemente por el desarrollo e implementación de sistemas de gestión integral que reconozcan el potencial valor de los subproduc-

tos tradicionalmente considerados como desechos, cerrando así los ciclos de materiales y energía en línea con los principios de la economía circular.

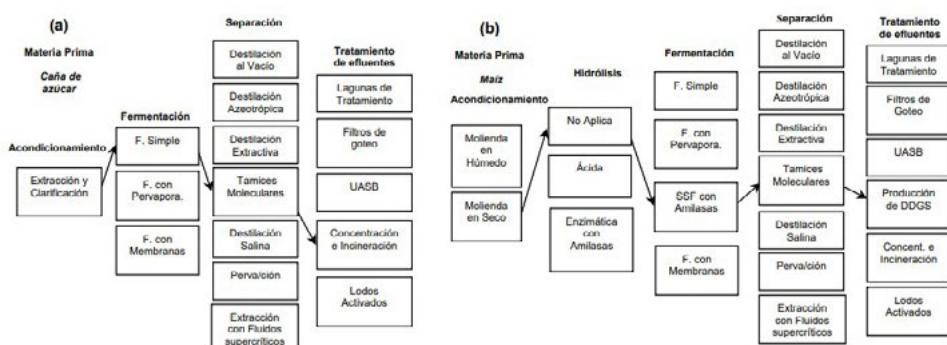
Capítulo 2

La Revolución del Ozono en el Tratamiento de Efluentes Industriales

Un Enfoque en la Industria Azucarera

La producción de biocombustibles representa uno de los pilares fundamentales en la transición hacia matrices energéticas más sostenibles, siendo el etanol de caña de azúcar uno de los más importantes a nivel global. De acuerdo con Cardona et al. (2005), “la producción de etanol a partir de caña de azúcar puede describirse como un proceso compuesto de cinco etapas principales: acondicionamiento de la materia prima, hidrólisis, fermentación, separación, deshidratación y tratamiento de efluentes”. Esta descripción estructural del proceso productivo evidencia la complejidad inherente a esta industria y establece las bases para comprender los desafíos ambientales asociados a cada fase del proceso. La interconexión entre estas etapas determina no solo la eficiencia productiva sino también la generación y características de los subproductos y efluentes, particularmente aquellos de mayor impacto ambiental como la vinaza. La optimización de este proceso integrado requiere necesariamente de aproximaciones sistémicas que consideren tanto los aspectos productivos como los ambientales, buscando synergias entre eficiencia operacional y sostenibilidad.

Figura 1. Diagrama de Flujo: Producción de Etanol desde Caña de Azúcar y Maíz



Fuente: tomado de Cardona et al. (2005).

Nota: (a) sacarosa proveniente de caña de azúcar (b) almidón obtenido de granos de maíz

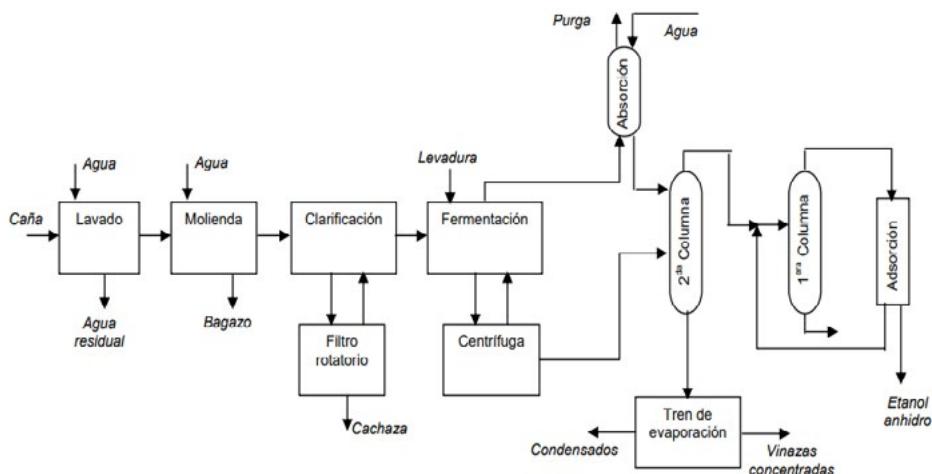
El Proceso de Fermentación: Complejidades Bioquímicas y Desafíos Operativos

La etapa de fermentación constituye el núcleo biotecnológico del proceso de producción de etanol, donde ocurren transformaciones bioquímicas fundamentales mediadas por microorganismos especializados. En esta etapa se lleva a cabo la transformación de glucosa y parte de la fructosa en etanol y dióxido de carbono, mediante la levadura *Saccharomyces cerevisiae* que es continuamente recirculada desde una centrífuga ubicadas aguas abajo del fermentador. Esta configuración operativa permite mantener altas densidades celulares y consecuentemente elevadas tasas de productividad, aunque introduce complejidades significativas en el control del proceso y en la gestión de los co-productos generados. Además de la producción de etanol se tuvo en cuenta la producción de distintos compuestos como acetaldehído, glicerol y alcoholes de fusel, los cuales representan tanto desafíos para la purificación del producto principal como oportunidades para la valorización de corrientes secundarias. Los gases formados en la fermentación son retirados y enviados a una torre de adsorción en la cual se debe recuperar el 98% en masa del etanol arrastrado (Cardona et al., 2005), estableciendo así requerimientos específicos de diseño y operación para minimizar pérdidas de producto y emisiones atmosféricas.

La separación y purificación del etanol producido biotecnológicamente representa una etapa crítica desde las perspectivas energética, económica y ambiental. La destilación “y la adsorción con tamices moleculares se usan para recuperar el etanol del caldo de fermentación obteniéndose etanol al 99,5% en peso de pureza. La destilación se lleva a cabo en dos columnas, la primera remueve el CO₂ disuelto (que se envía a la torre de absorción) y la mayoría del agua obteniéndose un destilado con 50% en peso de etanol y los fondos con una composición inferior al 0,1% en peso. La segunda columna concentra el etanol hasta una composición” azeotrópica (Cardona et al., 2005). Esta configuración secuencial de operaciones

de separación consume cantidades significativas de energía y genera corrientes residuales que requieren tratamiento adecuado, particularmente los fondos de las columnas de destilación que contienen la mayor parte de los compuestos no volátiles presentes en el caldo de fermentación. La optimización de estas operaciones unitarias representa una oportunidad importante para mejorar la sostenibilidad global del proceso, tanto mediante la reducción del consumo energético como a través del tratamiento y valorización de las corrientes residuales generadas.

Figura 2. Diagrama de Flujo. Producción de Etanol desde Jugo de Caña



Fuente: tomado de Cardona et al. (2005).

La Vinaza como Desafío Ambiental: Caracterización y Impactos

El tratamiento de efluentes constituye la etapa final del proceso productivo pero representa uno de los aspectos más críticos para su sostenibilidad ambiental. De los residuos desechados del “proceso de obtención de etanol a partir de caña de azúcar los de mayor volumen son” los fondos de la primera columna de destilación, conocidos como vinazas. La libre disposición de estos efluentes, como fue expuesto por Merino y Valderrama (2017), representan un desafío para

los ecosistemas naturales y pueden causar problemas ambientales en los lugares donde son vertidas las vinazas sin dosificación adecuada y sin tratamiento alguno, debido a su alta densidad “e incremento de la capacidad de infiltración en el suelo, incremento de” la acidez y turbidez del agua, generación de malos olores y contribución en la diseminación de enfermedades. Estos impactos ambientales multi-facéticos evidencian la necesidad de desarrollar y implementar sistemas de tratamiento efectivos que permitan gestionar este efluente de manera ambientalmente responsable, considerando tanto sus características particulares como los contextos específicos donde se genera y dispone.

Figura 3. Poza de vinaza



Fuente: tomado de Aqualimpia (s.f.).

Tabla 1. Caracterización de la Vinaza cruda de Caña de Azúcar

Parameter	Units	Average value
pH	-	4.29 ± 0.03
Conductivity	dS m ⁻¹	8.43 ± 0.19
Redox potential	mV	37.1 ± 58.2
COD	mg L ⁻¹	31,170 ± 492
BOD ₅	mg L ⁻¹	15,467 ± 289
BOD ₁₇	mg L ⁻¹	19,633 ± 764
BOD ₅ / COD	-	0.50 ± 0.02

Parameter	Units	Average value
Total Solids	g L-1	22.0 ± 0.4
Volatile Solids	g L-1	14.4 ± 0.7
Fixed solids	g L-1	8.1 ± 0.3
Oils and fats	mg L-1	1186 ± 339
Total hardness	mg L-1 CaCO ₃	3339.9 ± 312.5
Calcium hardness	mg L-1 CaCO ₃	1512.6 ± 158.0
Magnesium hardness	mg L-1 CaCO ₃	1827.3 ± 171.9
Kjeldahl nitrogen	mg N L-1	489.4 ± 103.9
Ammonium nitrogen	mg N L-1	46.2 ± 0
Ca	mg L-1	605.0 ± 63.2
Mg	mg L-1	444.1 ± 41.8
K	mg L-1	2480.6 ± 89.7
P	mg L-1	51.0 ± 35.5
Na	mg L-1	151.5 ± 8.5
Cl	mg L-1	2335.2 ± 254.0

Fuente: adaptado de Prazeres et al. (2019).

La caracterización precisa de la vinaza es fundamental para comprender su potencial impacto ambiental y diseñar estrategias de tratamiento adecuadas. De acuerdo con Gandini y Zúñiga (2013), la vinaza puede definirse como el efluente resultante de la producción de alcohol a partir de la fermentación y la destilación de una materia prima como residuos de caña de azúcar, se caracteriza por ser un líquido de color marrón, con una gran cantidad de sólidos suspendidos, olor a miel final y sabor a malta. Presenta pH bajo, altos valores de DQO, DBO₅ y una gran cantidad de sólidos en suspensión. Esta composición compleja explica los múltiples impactos ambientales asociados a su disposición inadecuada. La descarga descontrolada de vinazas en suelos puede impactar negativamente en la calidad de suelos, por ejemplo, la alta cantidad de sales solubles puede llevar a salinidad de suelos y una alta cantidad de sodio. Los bajos valores de pH de las vinazas están asociados a “la remoción de metales pesados en suelos y la gran cantidad de” sólidos suspendidos pueden llevar a condiciones anaeróbicas al cubrir los poros naturales del suelo, que

contribuyen a disminuir el pH y la remoción de metales mencionados previamente (Robles et al., 2012). Estos mecanismos de impacto operan de manera sinérgica, exacerbando los efectos negativos sobre los ecosistemas receptores.

La evaluación del potencial contaminante de la vinaza requiere necesariamente de parámetros objetivos y cuantificables que permitan caracterizar su impacto sobre los cuerpos de agua receptores. La demanda “química de oxígeno se define como la cantidad de un agente oxidante específico que reacciona con la muestra en condiciones controladas. La cantidad de oxidante consumido se expresa en términos de su equivalencia de oxígeno en mg/L o ppm. En resumen, la DQO es “la cantidad de oxígeno” que es consumido por las sustancias contaminantes presentes en el agua, ya sean sustancias orgánicas o inorgánicas. La DQO se usa a menudo como una medida de contaminantes en aguas residuales y aguas naturales (González y Marín, 2018). Este parámetro adquiere especial relevancia en el contexto de la gestión de la vinaza debido a los elevados valores típicamente observados en este efluente, los cuales reflejan su alta carga orgánica y consecuentemente su potencial para generar déficit de oxígeno en los cuerpos de agua receptores. La DQO “es un parámetro esencial en el tratamiento de aguas residuales e industriales porque representa la cantidad de oxígeno necesario para descontaminar el agua, permitiendo obtener una visión general de la calidad del tratamiento y de la depuración” del agua, estableciendo así un criterio objetivo para evaluar la efectividad de los procesos de tratamiento implementados.

Tecnologías de Oxidación Avanzada: Fundamentos y Aplicaciones

Los procesos “de oxidación avanzada comúnmente llamados POA son aquellos tratamientos terciarios que están basados en la generación de especies fuertemente oxidantes, que tiene como objetivo principal la eliminación de compuestos solubles no biodegra-

dables, presentes en las aguas residuales” (Castañeda, 2014). Dichos procesos usan oxidantes para reducir los niveles de DQO/DBO, y para separar los componentes orgánicos y los componentes inorgánicos oxidables. El agente oxidante es una especie radical denominada hidroxilo con una elevada capacidad oxidante y con tiempos de reacción” muy cortos. Esta caracterización de los POA destaca su potencial para el tratamiento de efluentes complejos como la vinaza, donde la presencia de compuestos recalcitrantes limita la efectividad de los tratamientos biológicos convencionales. La versatilidad de estos procesos permite su adaptación a diferentes contextos operativos y características de efluentes, aunque su implementación óptima requiere del entendimiento profundo de los mecanismos de reacción involucrados y de los factores que afectan su eficiencia.

El ozono emerge como uno de los agentes oxidantes más promisarios para el tratamiento de efluentes industriales complejos como la vinaza. El ozono es “uno de los agentes más oxidantes para la eliminación de sustancias químicas además del oxígeno puro y el aire, superando al cloro; por ello, se ha usado durante mucho tiempo como oxidante y desinfectante para el tratamiento de aguas. El ozono es muy selectivo y ataca principalmente a grupos funcionales ricos en electrones. Cuando sus reacciones en solución acuosa implican la formación de radicales hidroxilos (OH^{\cdot}), los métodos con ozono se consideran un AOP. El ozono puede producir radicales oxidantes en las aguas residuales, ya que reacciona de forma directa con un sustrato orgánico en forma lenta y selectiva o, por el contrario, a través de una reacción por radicales en medio alcalino, siendo esta rápida” y no selectiva (Pelayo, 2018). Esta dualidad en los mecanismos de reacción del ozono proporciona flexibilidad operativa pero también introduce complejidades en el diseño y optimización de los procesos de tratamiento, particularmente cuando se abordan efluentes con composiciones variables como la vinaza. Actualmente, “existe un interés renovado en las tecnologías del ozono debido a la capacidad de reacción directa. Sin embargo, una de las principales barreras de las tecnologías de ozono son los costes asociados a su

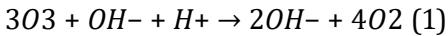
producción, es decir, el coste del oxígeno y de la energía eléctrica consumida. Por tanto, se utiliza el ozono para dos grandes aplicaciones en la actualidad, la potabilización o desinfección y el tratamiento de aguas residuales (Aracil, 2017). Esta dicotomía aplicativa refleja tanto las fortalezas como las limitaciones del ozono como tecnología de tratamiento.

Las propiedades fisicoquímicas del ozono determinan tanto su efectividad como agente oxidante como los desafíos asociados a su manipulación y aplicación. El ozono es “ampliamente conocido por su alto poder oxidante. Por esta razón se han desarrollado multitud de aplicaciones de ozono, principalmente para la eliminación de olores y color de las aguas residuales. A temperaturas ordinarias, el ozono es un gas de color azulado cuya característica principal es su olor irritante. Puede resultar explosivo en la reacción con otras sustancias o por su propia descomposición. Estas propiedades del ozono hacen que su utilización deba realizarse en ambientes ventilados, bajo un estricto control de fugas en las instalaciones y con detectores” de ozono (Aracil, 2017, p. 45). Estas consideraciones de seguridad adquieren especial relevancia en contextos industriales donde se manejan grandes volúmenes de ozono, requiriendo diseños de ingeniería apropiados y protocolos operativos estrictos. El entendimiento de estas propiedades es fundamental para el desarrollo de aplicaciones seguras y efectivas del ozono en el tratamiento de efluentes industriales.

Optimización del Proceso de Ozonización: Parámetros Críticos y Aplicaciones

El proceso de ozonización puede operar a través de diferentes mecanismos dependiendo de las condiciones específicas del medio. El ozono “puede reaccionar directamente con un sustrato orgánico, mediante una reacción lenta,” que puede ser acelerada si se lleva a cabo en un medio alcalino que propicia la generación de iones hi-

droxilo y, por tanto, aumenta la efectividad de la reacción mediante la siguiente reacción:



Este fundamento químico explica la dependencia crítica del pH en la efectividad del proceso de ozonización, particularmente para efluentes con características complejas como la vinaza. Este “método posee la ventaja que el ozono solo se transforma en oxígeno y agua, y no presenta la toxicidad de tratamientos convencionales que utilizan cloro o ácido crómico. Además, el ozono puede producirse *in situ* por descarga eléctrica en una corriente de aire, y no deja olores ni gustos residuales” (Pelayo, 2018, p. 54). Estas características favorecen la aplicación del ozono en contextos donde la generación de subproductos de tratamiento problemáticos debe minimizarse, aunque la optimización del proceso requiere necesariamente de la consideración cuidadosa de las ventajas y limitaciones específicas.

La evaluación balanceada de las ventajas y desventajas del ozono como tecnología de tratamiento es fundamental para determinar su aplicabilidad en contextos específicos. Entre las ventajas más significativas se encuentra su capacidad para eliminar microorganismos como bacterias y virus, siendo hasta 3000 veces más efectivo que el cloro, impide la formación de sales inorgánicas en el agua y elimina malos olores (Apaza y Laiza, 2022). Estas características lo hacen particularmente atractivo para el tratamiento de efluentes con alta carga orgánica y microbiológica como la vinaza. Sin embargo, estas ventajas deben ponderarse frente a desventajas significativas como su tiempo de vida muy corto (alrededor de 25 minutos), la necesidad de generación *in situ*, y el riesgo comprobado de corrosión por presencia de óxido o ácido nítricos en las instalaciones de tratamiento con ozono (Apaza y Laiza, 2022). Esta evaluación integral de pros y contras permite tomar decisiones fundamentadas sobre la implementación del ozono en esquemas de tratamiento específicos, considerando tanto aspectos técnicos como económicos y operativos.

El contexto normativo actual establece requerimientos específicos para la gestión de aguas residuales industriales, definiendo el marco dentro del cual deben operar las tecnologías de tratamiento. Son residuos líquidos generados en los procesos industriales. Poseen características específicas, dependiendo del tipo de industria que proviene, como por ejemplo actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial y otras. “La depuración de los efluentes líquidos es una parte fundamental de la gestión ambiental en cualquier industria. Debe asumirse en su doble faceta de obligación medioambiental con la sociedad y como parte del proceso de producción” (Campoverde, 2019, p. 34). Esta perspectiva integradora refleja la evolución en el enfoque de gestión de efluentes industriales, transitando desde aproximaciones basadas exclusivamente en el cumplimiento normativo hacia modelos que reconocen el valor estratégico de la gestión ambiental. De acuerdo con Rosales (2020), el tratamiento de aguas residuales está compuesto por diferentes procesos fisicoquímicos y biológicos, este sistema debe tener la eficiencia mínima de reducción de parámetros contaminantes, el agua residual después de pasar por todas las etapas debe salir con los parámetros dentro de los límites máximos permisibles, estableciendo así criterios de desempeño claros para los sistemas de tratamiento.

El marco normativo peruano establece requisitos específicos para la calidad de los cuerpos de agua receptores, los cuales determinan los objetivos de tratamiento para efluentes como la vinaza. El presente decreto DS-004-2017 establece los niveles de concentración de elementos, sustancias, parámetros fisicoquímicos y biológicos, presentes en el agua en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos que no represente riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente (MINAM, 2017). Este instrumento normativo proporciona el marco de referencia para evaluar la efectividad de los procesos de tratamiento y define los límites que deben alcanzarse para garantizar la protección de los ecosistemas acuáticos y la salud pública. La adecuación a estos estándares representa un desafío técnico significa-

tivo para la industria azucarera, particularmente en lo que respecta al tratamiento de la vinaza, debido a las características particulares de este efluente.

Tabla 2. Categorización de las fases operativas en la cadena de purificación de efluentes.

Etapa	Objetivos de tratamiento
• Tratamiento “preliminar”	• Eliminación de basura, arenas y regulación de caudal
• Tratamiento primario	• Eliminación de material sedimentable
• Tratamiento secundario	• Eliminación de materia orgánica biodegradable
• Tratamiento terciario	• Mejorar el efluente de un tratamiento secundario
• Desinfección	• Remoción de nutrientes (N y/o P)
• Tratamiento de lodos	• Remoción de otros contaminantes • Eliminación de microorganismos patógenos • Producir lodo apto para su disposición final • Producción de lodo estabilizado

Fuente: Adaptado de Rosales, 2020

Planteamiento del Problema de Investigación: Enfoque y Metodología

La complejidad del tratamiento de la vinaza mediante ozonización requiere la identificación precisa de los factores que determinan la efectividad del proceso. La pregunta de investigación ¿Cómo influye el pH y la concentración de ozono en la disminución del DQO mediante el proceso de ozonización del residuo industrial–vinaza? surge de la necesidad de optimizar este promisorio pero complejo proceso de tratamiento. Esta pregunta de investigación reconoce la multifactorialidad inherente al proceso de ozonización y busca elucidar las interacciones entre parámetros operativos críticos y su efecto sobre indicadores de desempeño clave como la reducción de DQO. La hipótesis de trabajo que postula que el pH y la concentración de ozono influyen directamente en la reducción del DQO presentes en el residuo industrial – vinaza proporciona un marco conceptual para guiar la investigación experimental y el análisis de resultados.

Esta aproximación hipotético-deductiva permite abordar sistemáticamente la optimización del proceso de ozonización para el tratamiento de la vinaza.

La justificación de la investigación se fundamenta en la urgencia ambiental asociada al manejo inadecuado de la vinaza y el potencial de la ozonización como tecnología de tratamiento efectiva. La presente investigación sobre “influencia del pH y concentración de ozono en la disminución del DQO presente en los residuos generados en la industria azucarera adquieren una significativa importancia en la actualidad debido al inadecuado tratamiento del insumo vinaza, siendo este un factor importante y crítico para la preservación del medio ambiente, a su vez para la protección de la salud pública como está estipulado en el” DS-004-2017-MINAM. Esta justificación normativa se complementa con consideraciones técnicas basadas en las características específicas de la vinaza, la cual tiene un alto poder contaminante, alrededor de “100 veces mayor que las aguas residuales domésticas, debido” a su riqueza en materia orgánica y su alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO). También presenta otras características contaminantes como pH bajo, alta corrosividad y temperatura a la salida de los destiladores (Medina 2019). Estas características explican por qué se considera altamente perjudiciales para la fauna, la flora y microflora del agua dulce, y justifican la búsqueda de tecnologías de tratamiento efectivas.

La investigación propuesta se alinea con los esfuerzos globales hacia el desarrollo de tecnologías sostenibles para la gestión de residuos industriales. El efecto en las características químicas de suelos y la calidad de aguas filtradas en áreas que reciben permanentemente adición de vinaza, donde se concluye que existe posibilidad de contaminación de los cursos de agua por la aplicación de vinaza cuyos valores de DQO, Ca, Mg, K y C.E. (González et al., 2018) evidencia la urgencia de desarrollar soluciones efectivas. Lo cual justifica porque se debe investigar nuevas tecnologías de tratamiento de vinaza para luego ser vertidos en los campos de cultivo como fertiirrigación

debido a que existen estudios que concluyen que la contaminación generada por el vertido de vinazas tiene un impacto al medio ambiente, categoría ECA 3, subcategoría D1 para el riego de las aguas donde se filtra este residuo. Permitiendo así aprovechar en lo posible este material controlando su impacto negativo al medio ambiente al mantener la calidad del agua en niveles aceptables (Ibarra et al., 2019). Esta aproximación de economía circular, que busca simultáneamente tratar el efluente y valorizarlo como recurso, representa el paradigma más promisorio para la gestión sostenible de la vinaza.

Los objetivos de la investigación se estructuran jerárquicamente para abordar sistemáticamente el problema de investigación planteado. El objetivo general de determinar la influencia del pH y la concentración de ozono para disminuir el DQO del residuo industrial–vinaza establece el marco general de la investigación, mientras que los objetivos específicos operacionalizan este propósito general mediante acciones concretas. El primer objetivo específico de determinar el pH de la vinaza adecuada para la disminución del DQO se enfoca en la optimización de este parámetro crítico para el proceso de ozonización. El segundo objetivo específico de obtener información sobre la dosificación de ozono para disminuir el DQO de la vinaza aborda el otro factor operativo fundamental para la efectividad y eficiencia económica del proceso. Esta estructuración de objetivos permite una aproximación metodológica sistemática a la optimización del proceso de ozonización para el tratamiento de la vinaza, generando conocimiento tanto fundamental como aplicado relevante para la industria azucarera y el sector de tratamiento de efluentes industriales.

Capítulo 3

*Un Enfoque Sistemático para el Tratamiento de Vinaza
Mediante Ozonización*

Diseño y Configuración Experimental

La investigación se sustentó en un diseño experimental rigurosamente estructurado que permitió evaluar la eficacia del proceso de ozonización en el tratamiento de vinaza procedente de la industria azucarera. La población bajo estudio consistió en muestras de vinaza generadas durante la etapa de destilación en un ingenio azucarero representativo de la región, seleccionada por su producción constante y características típicas de este tipo de efluentes. Para garantizar la representatividad y consistencia en los análisis, se recolectaron metódicamente 20 litros de vinaza, los cuales fueron preservados bajo condiciones controladas para mantener sus propiedades físico-químicas iniciales hasta el momento de su procesamiento (Ibarra et al., 2019). La selección de este volumen muestral respondió a consideraciones estadísticas y operativas, permitiendo realizar réplicas experimentales suficientes para asegurar la robustez de los resultados mientras se mantenía la viabilidad logística del estudio. La procedencia controlada de las muestras garantizó la homogeneidad del material de partida, aspecto fundamental para establecer comparaciones válidas entre los diferentes tratamientos aplicados y minimizar la variabilidad atribuible a diferencias en la composición inicial del efluente.

La infraestructura analítica empleada en la investigación comprendió una selección exhaustiva de materiales, equipos y reactivos de grado analítico, certificados y calibrados según protocolos estandarizados. Entre los materiales de vidrio destacaron fiolas volumétricas Boeco de 100 ml y 1000 ml, matraces Erlenmeyer de 250 ml, pipetas de cristal MBL graduadas de clase B de 10 ml, y probetas Pyrex de 500 ml, 1000 ml y 100 ml, todos ellos sometidos a procedimientos de limpieza y acondicionamiento previos para eliminar cualquier interferencia analítica. El equipo central del sistema experimental consistió en un ozonizador regulable marca Purozono, capaz de generar flujos precisos y constantes de ozono, complementado con balanzas de laboratorio y analítica T-Scale para mediciones

gravimétricas exactas, y una cocina eléctrica para los procesos que requirieron control térmico. La selección de reactivos incluyó dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), sulfato de plata (Ag_2SO_4), ácido sulfúrico (H_2SO_4), solución indicadora de ferroína, sulfato ferroso amónico (SFA), sulfato de mercurio (Hg_2SO_4), ácido sulfámico, patrón de biftalato de potasio y solución de hidróxido de sodio 0.1 N, todos de alta pureza y preparados según las especificaciones técnicas requeridas para cada determinación analítica (González y Marín, 2018). Esta meticulosa selección de insumos garantizó la confiabilidad de las mediciones y la trazabilidad de los resultados obtenidos.

Procedimientos Operativos y Esquema Experimental

El núcleo metodológico de la investigación consistió en la implementación de un diseño experimental bifactorial que permitió evaluar sistemáticamente el efecto individual y sinérgico de dos variables críticas en el proceso de ozonización. La Variable A correspondió a la dosificación de ozono, establecida en tres niveles operativos: 200 mg/h, 400 mg/h y 600 mg/h, seleccionados mediante pruebas preliminares que identificaron este rango como técnicamente viable y potencialmente efectivo. La Variable B consistió en el pH de la solución de vinaza, ajustado a valores de 5, 7 y 9 para cubrir condiciones ácidas, neutras y alcalinas, respectivamente, dado que este parámetro influye determinantemente en los mecanismos de reacción del ozono con los compuestos orgánicos presentes en el efluente (Pelayo, 2018). La combinación de estos factores generó nueve condiciones experimentales distintas, cada una de las cuales fue replicada para asegurar la significancia estadística de los resultados y permitir el análisis de varianza posterior. Este abordaje metodológico permitió no solo evaluar el efecto individual de cada factor, sino también identificar posibles interacciones entre ellos que pudieran potenciar o inhibir la eficiencia del proceso de tratamiento.

La secuencia experimental se desarrolló mediante un protocolo estandarizado que inició con la recolección y almacenamiento de las muestras de vinaza en depósitos plásticos de 10 L, los cuales fueron transportados al laboratorio bajo condiciones controladas de temperatura para preservar las características originales del efluente. Una vez en el laboratorio, se procedió a la cuantificación de la concentración inicial de DQO total mediante el análisis de una porción homogenizada de vinaza sin tratamiento ni dilución, estableciendo así la línea base contra la cual se evaluaría la eficiencia de los tratamientos aplicados. Posteriormente, se realizó la homogenización de la muestra inicial y su dilución en proporción 1:1.5 de vinaza y agua respectivamente, utilizando probetas de 1000 ml para garantizar precisión volumétrica. Esta dilución fue necesaria para adaptar la concentración de contaminantes a los rangos de trabajo del método analítico y facilitar el tratamiento posterior. Las muestras diluidas fueron sometidas a acondicionamiento para alcanzar los valores de pH establecidos en el diseño experimental (5, 7 y 9), mediante la adición controlada de soluciones acidificantes o alcalinizantes, verificando los valores finales con cintas Colorphast y pH-metro calibrado.

Tabla 3. Elementos variables del sistema en observación.

Variable independiente de estudio	Niveles de estudio
Variable A: Flujo de Ozono dosificado	A ₁ , A ₂ , A ₃
Variable B: pH de la solución	B ₁ , B ₂ , B ₃
Variable Dependiente de estudio	Porcentaje de DQO removido

Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas, 2024

Tabla 4. Disposición sistemática de factores e interacciones bajo estudio.

Variable	A ₁	A ₂	A ₃
B ₁	A ₁ B ₁	A ₂ B ₁	A ₃ B ₁
B ₂	A ₁ B ₂	A ₂ B ₂	A ₃ B ₂
B ₃	A ₁ B ₃	A ₂ B ₃	A ₃ B ₃

Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas, 2024

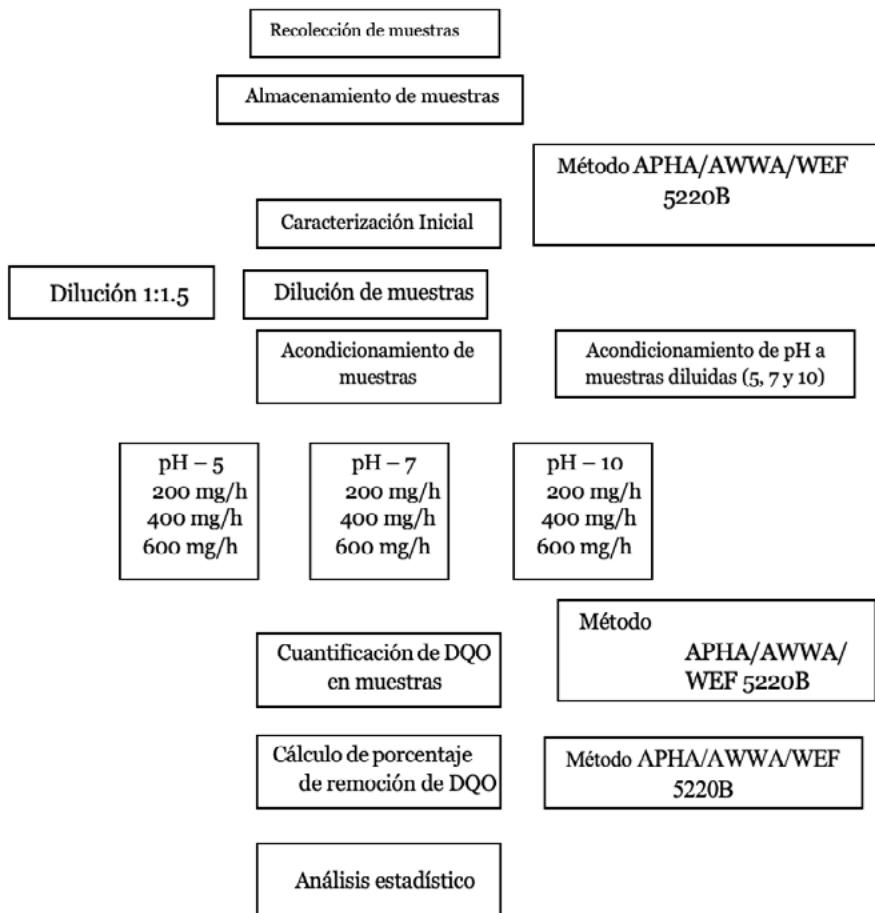
Donde:

Variable A: Flujo de dosificación de ozono (200 mg/h, 400 mg/h y 600 mg/h)

Variable B: pH de solución (5, 7 y 10)

La etapa central del procedimiento consistió en la ozonización de las muestras previamente acondicionadas, proceso que se realizó en matraces de 1000 ml donde se introdujeron las muestras junto con la manguera de dosificación del equipo ozonizador, operando a los flujos establecidos (200 mg/h, 400 mg/h y 600 mg/h) durante un tiempo de retención constante de 60 minutos para todos los tratamientos. Transcurrido este tiempo, se procedió a la cuantificación de DQO en las muestras tratadas mediante la aplicación del método APHA/AWWA/WEF 5220B para la determinación de DQO a través de reflujo cerrado, técnica ampliamente reconocida por su precisión y reproducibilidad en el análisis de aguas residuales complejas (González y Marín, 2018). El porcentaje de remoción de DQO se calculó aplicando la ecuación establecida que relaciona la DQO inicial (DQO₀) con la DQO final (DQO) después del tratamiento, permitiendo cuantificar la eficiencia del proceso bajo cada condición experimental. Esta metodología sistemática garantizó la obtención de datos comparables y confiables para el posterior análisis estadístico y la interpretación de resultados.

Figura 4. Representación estructural del proceso metodológico desplegado en el trabajo experimental.



Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Análisis de Resultados y Evaluación Estadística

La caracterización inicial de la muestra de vinaza reveló valores basales de DQO que confirmaron el elevado poder contaminante de este efluente y justificaron la necesidad de implementar tratamientos eficaces para su adecuada gestión ambiental. Los resultados de las determinaciones de DQO en la muestra inicial y diluida propor-

cionaron la referencia fundamental para calcular los porcentajes de remoción alcanzados bajo las diferentes condiciones experimentales, estableciendo una línea base consistente para todas las comparaciones posteriores. El análisis exhaustivo de los porcentajes de remoción obtenidos a pH 5 evidenció comportamientos diferenciales según la dosificación de ozono aplicada, mostrando tendencias claras que permitieron establecer relaciones preliminares entre las variables operativas y la eficiencia del tratamiento. Patrones similares fueron meticulosamente documentados para los ensayos realizados a pH 7 y pH 9, generando un corpus de datos integral que capturó la variabilidad del sistema en respuesta a los factores experimentales manipulados.

La síntesis gráfica de los porcentajes de remoción de DQO, representada en la figura consolidada que recopila las curvas de remoción promedio, proporcionó una visualización clara de las tendencias fundamentales identificadas en el estudio. El análisis de estas curvas reveló que los mayores porcentajes de remoción, en el rango de 13% a 14%, se alcanzaron consistentemente en condiciones alcalinas (pH 9), con un valor máximo de 13.84% logrado operando a la máxima dosificación de ozono evaluada (600 mg/h). Las curvas correspondientes a pH 5 y pH 7 mostraron porcentajes de remoción promedio notablemente inferiores y comportamientos similares entre sí, con diferencias mínimas de apenas 1% a 1.5% cuando se operó a 200 mg/h y 400 mg/h, respectivamente. Un hallazgo particularmente interesante fue la tendencia a la estabilización del porcentaje de remoción observada a pH 7, sugiriendo la posible existencia de un punto de saturación en la eficiencia del proceso bajo condiciones neutras. Adicionalmente, se identificó un incremento significativo en la remoción de DQO a partir de 400 mg/h tanto a pH 5 como a pH 7, mientras que a pH 9 la curva mostró una pendiente menos pronunciada pero sostenida, confirmando la superioridad de las condiciones alcalinas para maximizar la eficiencia del proceso de ozonización aplicado a la vinaza.

El análisis estadístico mediante ANOVA, realizado con el software STATGRAPHICS 19, proporcionó el sustento cuantitativo para validar las observaciones experimentales y establecer conclusiones estadísticamente sólidas. Los resultados del análisis de varianza, consignados en la tabla correspondiente, confirmaron que los valores de P para los parámetros de pH y dosificación de ozono fueron consistentemente inferiores a 0.05, umbral establecido para determinar significancia estadística al nivel de confianza del 95%. Este hallazgo demuestra concluyentemente que ambas variables experimentales ejercen una influencia estadísticamente significativa en el porcentaje de remoción de DQO, validando las hipótesis planteadas en la investigación respecto a la relevancia de estos factores operativos en la eficacia del proceso de tratamiento. La aplicación de esta herramienta estadística no solo permitió verificar la significancia de los efectos principales de cada factor, sino que también facilitó la detección de posibles interacciones entre ellos, proporcionando así una comprensión más integral del sistema estudiado y estableciendo bases sólidas para la optimización futura de los parámetros operativos del proceso de ozonización aplicado al tratamiento de vinaza.

Capítulo 4

Eficiencia del Tratamiento de Vinaza Mediante Ozonización

Caracterización Inicial y Parámetros de Referencia

La fase inicial de la investigación comprendió la caracterización exhaustiva de la muestra de vinaza previa a la aplicación de los tratamientos, estableciendo así los parámetros basales esenciales para evaluar posteriormente la eficiencia de los procesos de ozonización. Se recopilaron metódicamente los datos correspondientes al valor de DQO total inicial y DQO de blanco después de su dilución, determinaciones que proporcionaron la línea base de referencia contra la cual se contrastarían todos los resultados posteriores del tratamiento. Esta caracterización inicial reveló la compleja composición del efluente y su elevado potencial contaminante, confirmando la necesidad de implementar tecnologías de tratamiento efectivas para su adecuada gestión ambiental (Ibarra et al., 2019).

Tabla 5. Parámetros de Carga Orgánica: DQO Inicial y Post-Dilución

Parámetro	Valor	Unidad
DQO inicial	55532	mg/L
DQO muestra diluida	20748	mg/L

Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Los valores obtenidos en esta fase no solo cuantificaron el grado de contaminación orgánica presente en la vinaza, sino que también permitieron estandarizar las condiciones experimentales y validar la consistencia de la metodología analítica empleada a lo largo de todo el estudio. La determinación del blanco, por su parte, constituyó un control fundamental para descartar interferencias metodológicas y asegurar que las reducciones observadas en DQO fueran atribuibles exclusivamente al tratamiento aplicado y no a artefactos experimentales o variaciones analíticas.

Eficiencia de Remoción de DQO: Patrones y Tendencias

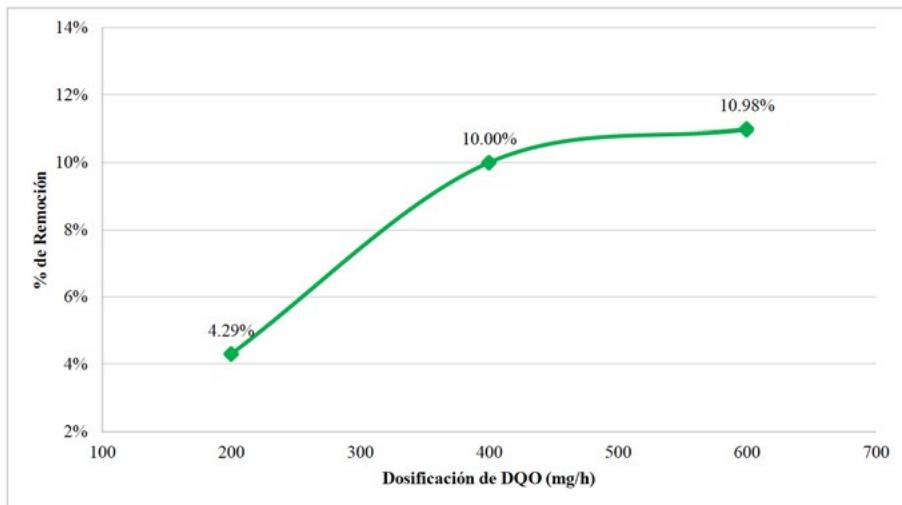
El núcleo del análisis de resultados residió en la determinación precisa de los porcentajes de remoción de DQO alcanzados bajo las diferentes condiciones experimentales evaluadas. La presentación sistemática de estos resultados en las tablas y figuras correspondientes permitió visualizar de manera integral las concentraciones finales de DQO y los porcentajes de remoción obtenidos a diferentes niveles de pH y dosificación de ozono, estableciendo correlaciones claras entre las variables operativas y la eficiencia del proceso. El análisis específico de los porcentajes de remoción a pH 5 reveló patrones comportamentales distintivos que evidenciaron la influencia determinante de este parámetro en la efectividad del tratamiento, mostrando variaciones significativas en función de la dosificación de ozono aplicada. Estas variaciones respondieron a los diferentes mecanismos de reacción que predominan en medio ácido, donde el ozono tiende a reaccionar directamente con los contaminantes mediante mecanismos de electrófilos, generalmente más lentos y selectivos que las reacciones radicalarias que predominan en medio alcalino (Pelayo, 2018). La documentación meticulosa de estos comportamientos diferenciales permitió establecer relaciones cuantitativas entre las condiciones operativas y la eficiencia de remoción, generando conocimiento fundamental para la optimización del proceso.

Tabla 6. Resultados de la primera réplica para la reducción de DQO a pH 5.

Blanco (mg/L)	Dosificación de ozono (mg/h)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
	200	19857	4,29
20748	400	18674	10,0
	600	18470	10,98

Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Figura 5. Cinética de Reducción de DQO en Medio Ácido



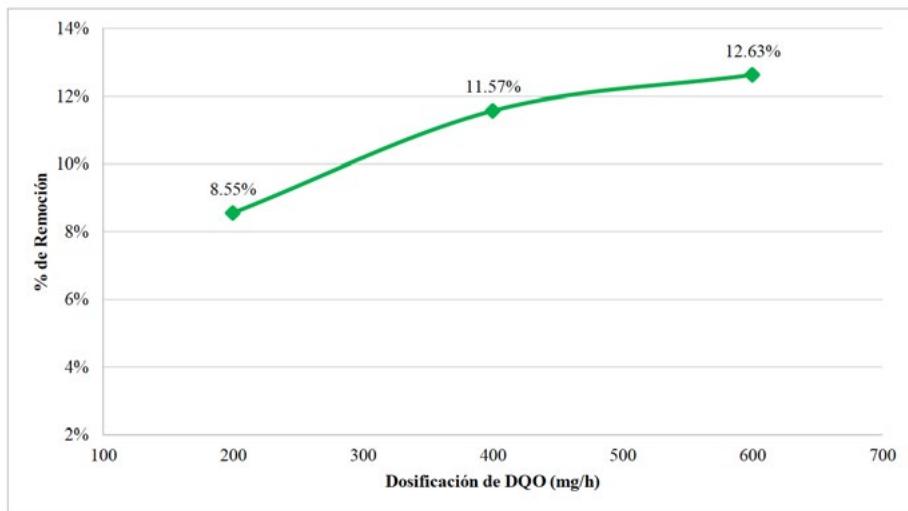
Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Tabla 7. Resultados de la segunda réplica para la reducción de DQO a pH 5.

Blanco (mg/L)	Dosificación de Ozono (mg/h)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
	200	18974	8,55
20748	400	18347	11,57
	600	18128	12,63

Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Figura 6. Resultados de la segunda réplica para la reducción de DQO a pH 5.



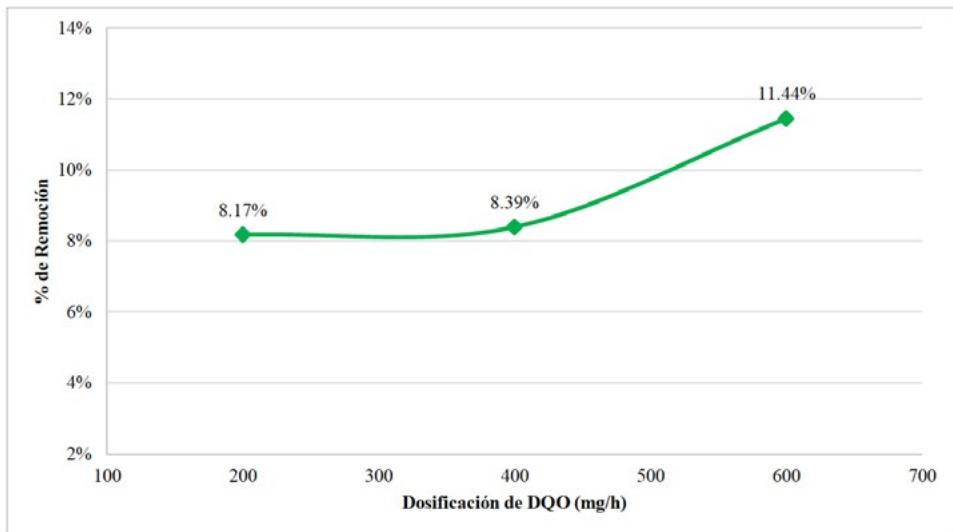
Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Tabla 8. Resultados de la tercera réplica para la reducción de DQO a pH 5.

Blanco (mg/L)	Dosificación de Ozono (mg/h)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
	200	19052	8,17
20748	400	19007	8,39
	600	18374	11,44

Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Figura 7. Patrón consolidado de eliminación en medio ácido: tercera y última réplica de la reducción de DQO a pH 5.



Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

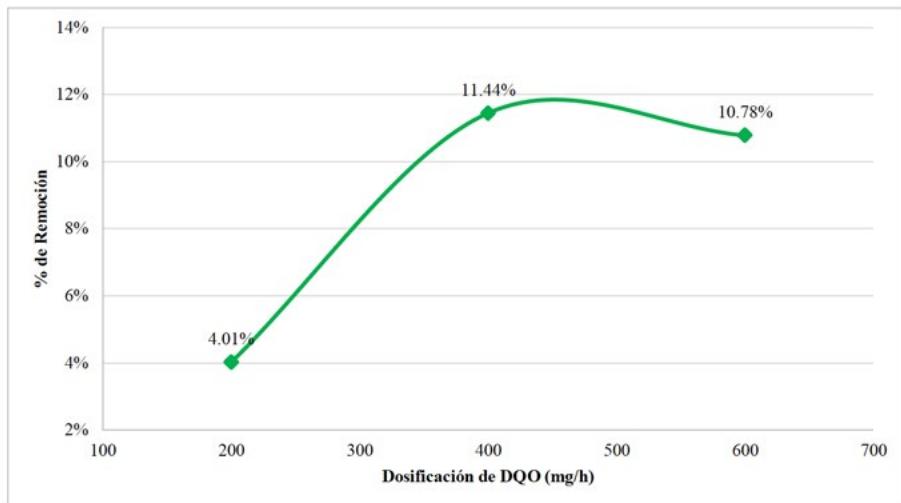
Evaluación de la efectividad en condiciones neutras:

Tabla 9. Resultados de la primera réplica para la reducción de DQO a pH 7.

Blanco (mg/L)	Dosificación de Ozono (mg/h)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
	200	19915	4,01
20748	400	18374	11,44
	600	18512	10,78

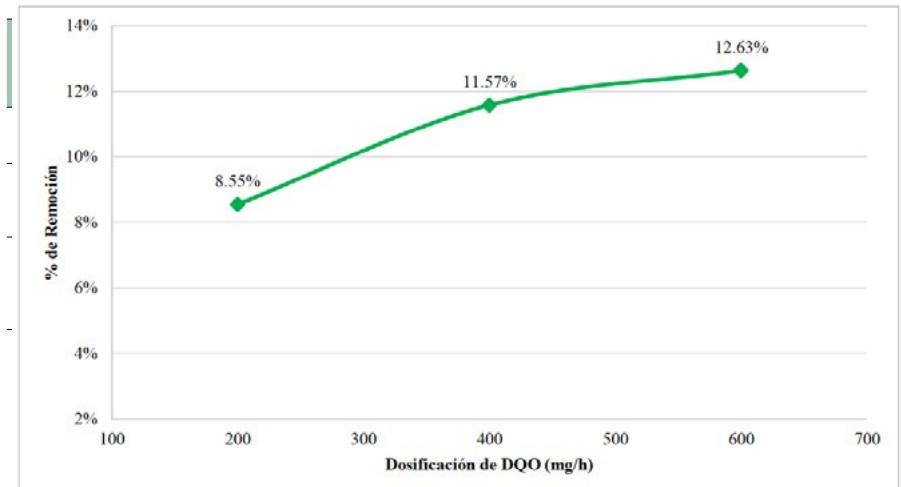
Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Figura 8. Patrón de Eliminación de DQO en Medio Ácido



Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Tabla 10. Resultados de la segunda réplica para la reducción de DQO a pH 7.



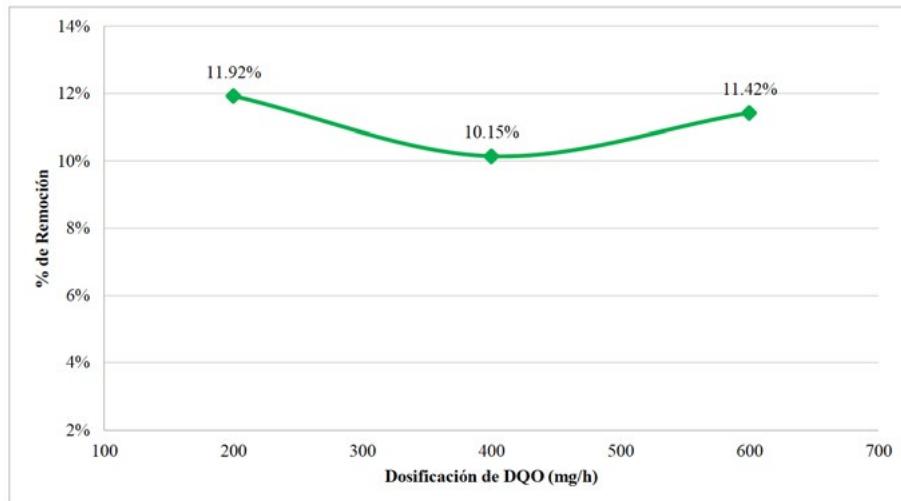
Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Tabla 11. Resultados de la tercera réplica para la reducción de DQO a pH 7.

Blanco (mg/L)	Dosificación de Ozono (mg/h)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
	200	18274	11,92
20748	400	18642	10,15
	600	18378	11,42

Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Figura 10. Curva de remoción a pH 7 – III Réplica



Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

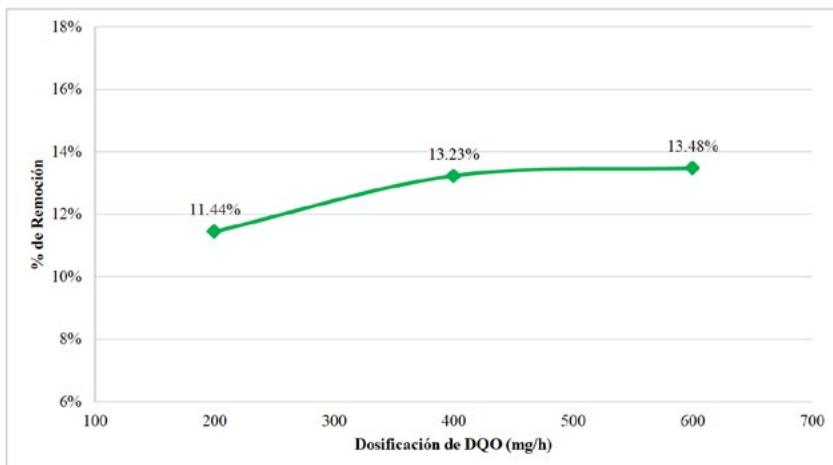
Porcentaje de remoción a pH 9

Tabla 12. Resultados de la primera réplica para la reducción de DQO a pH 7.

Blanco (mg/L)	Dosificación de Ozono (mg/h)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
	200	18374	11,44
20748	400	18004	13,23
	600	17952	13,48

Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Figura 11. Patrón de Eliminación de DQO en Medio Alcalino



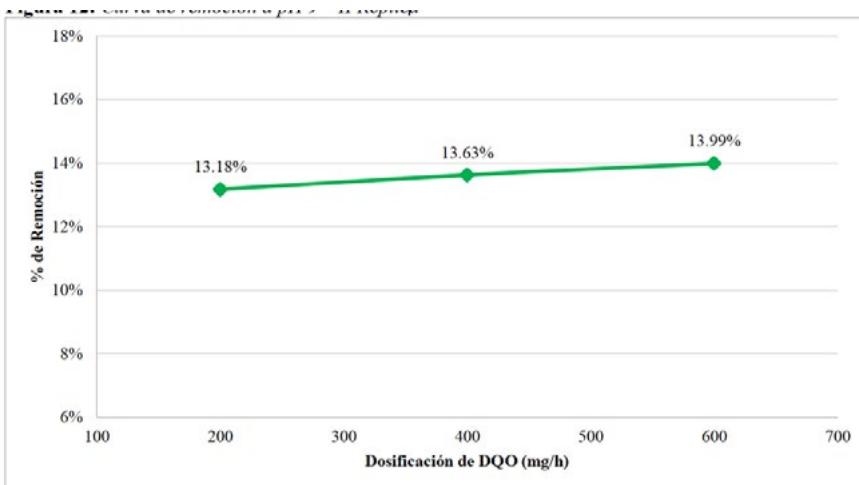
Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Tabla 13. Segunda Réplica: Reducción de DQO a pH 9

Blanco (mg/L)	Dosificación de Ozono (mg/h)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
	200	18014	13,18
20748	400	17921	13,63
	600	17845	13,99

Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Figura 12. Curva de remoción a pH 9 – II Réplica



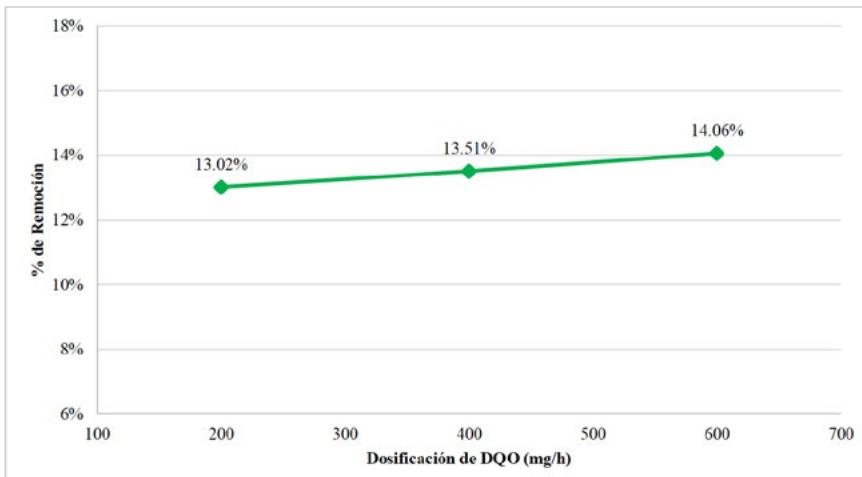
Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Tabla 14. Tercera Réplica: Reducción de DQO a pH 9

Blanco (mg/L)	Dosificación de Ozono (mg/h)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
	200	18047	13,02
20748	400	17945	13,51
	600	17831	14,06

Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Figura 13. Patrón de Eliminación: Tercera Réplica de DQO a pH 9



Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

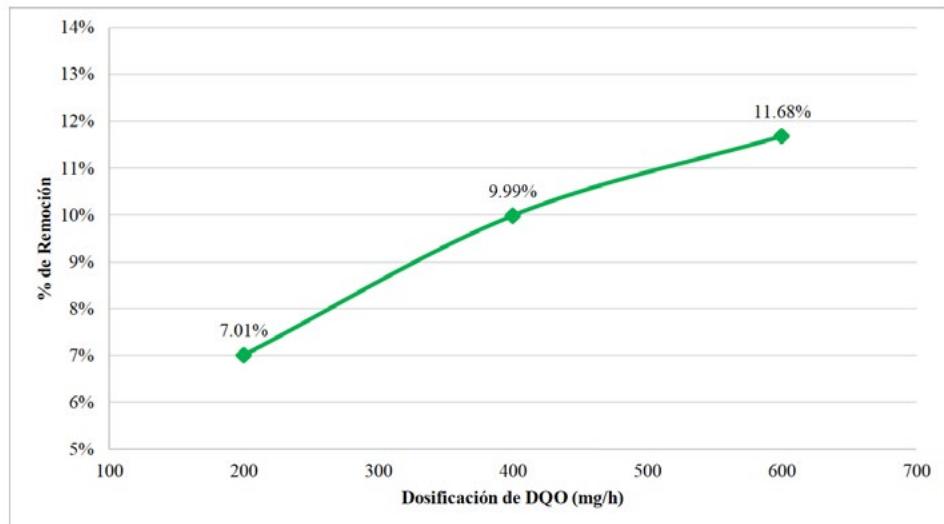
Porcentaje de remoción promedio

Tabla 15. Resultados de remoción de DQO a pH 5 – promedio

Blanco (mg/L)	Dosificación de Ozono (mg/h)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
	200	19294	7,01
20748	400	18676	9,99
	600	18324	11,68

Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Figura 14. Patrón de Eliminación: Curva Promedio de DQO a pH 5



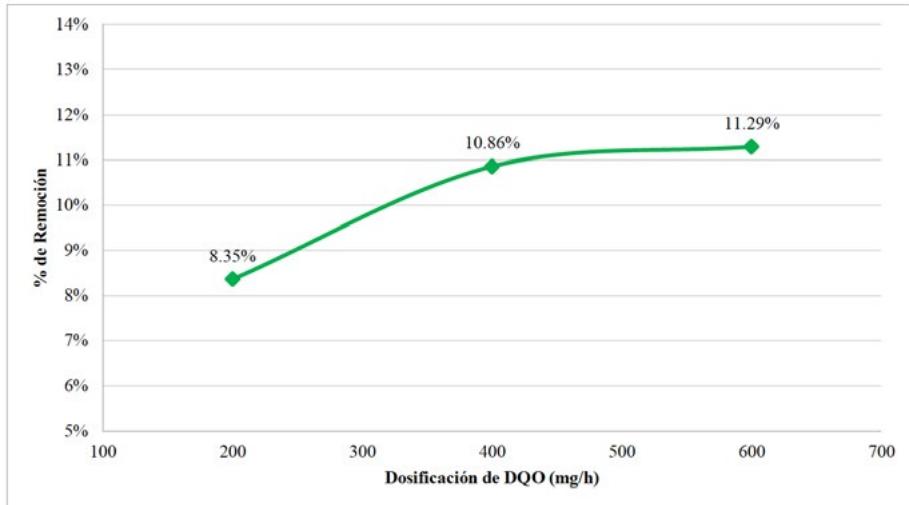
Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Tabla 16. Resultados de remoción de DQO a pH 7 – Promedio

Blanco (mg/L)	Dosificación de Ozono (mg/h)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
	200	19015	8,35
20748	400	18495	10,86
	600	18406	11,29

Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Figura 15. Curva de remoción a pH 7 –Promedio



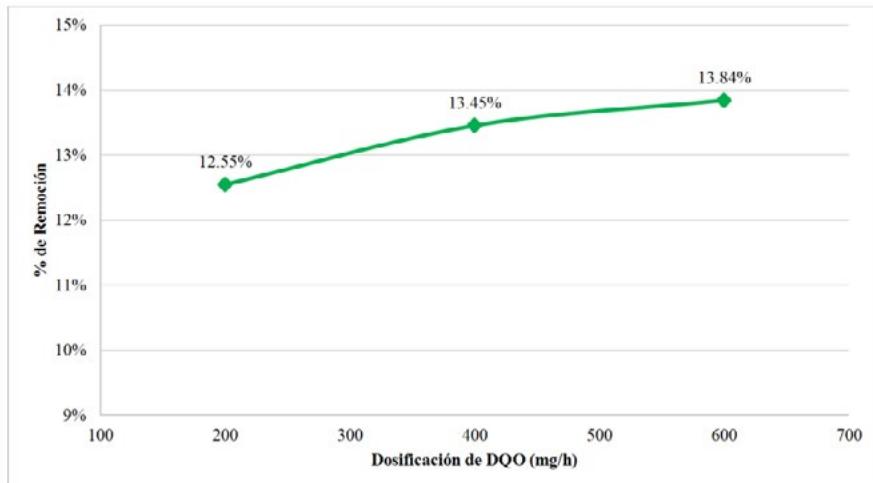
Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Tabla 17. Resultados de remoción de DQO a pH 9 – Promedio

Blanco (mg/L)	Dosificación de Ozono (mg/h)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
	200	18145	12,55
20748	400	17956	13,45
	600	17876	13,84

Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Figura 16. Curva de remoción a pH 9 – Promedio



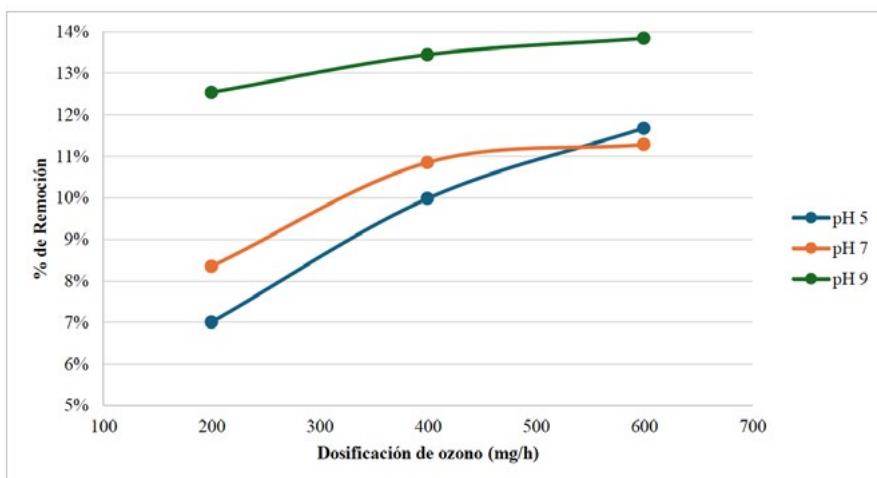
Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Gráfica resumen de porcentaje de remoción de DQO

La síntesis gráfica de los porcentajes de remoción, consolidada en la figura resumen, proporcionó una visualización integrada de las curvas de remoción promedio de DQO que capturó las tendencias esenciales del sistema bajo estudio. El análisis de estas curvas reveló que los mayores porcentajes de remoción, oscilando entre 13% y 14%, se alcanzaron consistentemente en condiciones alcalinas (pH 9), con un valor máximo de 13.84% logrado al operar con la máxima

dosificación de ozono evaluada (600 mg/h). Este comportamiento superior en medio alcalino puede atribuirse a la descomposición catalítica del ozono que genera radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), especies altamente reactivas y no selectivas que oxidan eficientemente una amplia gama de compuestos orgánicos presentes en la vinaza (Castañeda, 2014). En contraste, las curvas correspondientes a pH 5 y pH 7 mostraron porcentajes de remoción promedio notablemente inferiores y comportamientos similares entre sí, con diferencias mínimas de apenas 1% a 1.5% cuando se operó a 200 mg/h y 400 mg/h, respectivamente. Un hallazgo particularmente relevante fue la tendencia a la estabilización del porcentaje de remoción observada a pH 7, sugiriendo la posible existencia de un punto de saturación en la eficiencia del proceso bajo condiciones neutras donde coexisten mecanismos de reacción directos e indirectos.

Figura 17. Representación de los porcentajes de remoción de DQO a diferentes pH



Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

Análisis Estadístico y Validación de Resultados

La validación estadística de los resultados experimentales mediante análisis de varianza (ANOVA) constituyó la fase final del pro-

cesamiento de datos, proporcionando el sustento cuantitativo para establecer conclusiones estadísticamente sólidas sobre la influencia de las variables estudiadas. En el estudio estadístico de la influencia del pH (5, 7, 9) y la dosificación de ozono (200 mg/h, 400 mg/h y 600 mg/h) en el porcentaje de remoción de DQO se utilizó el software estadístico STATGRAPHICS 19, herramienta especializada que permitió aplicar pruebas robustas de significancia y determinar el grado de influencia de cada factor en la variable respuesta. Los resultados del análisis ANOVA, consignados en la tabla correspondiente, confirmaron consistentemente que los valores de P para los parámetros de pH y dosificación de ozono fueron inferiores a 0.05, umbral establecido para determinar significancia estadística al nivel de confianza del 95%. Este hallazgo demuestra concluyentemente que ambas variables experimentales ejercen una influencia estadísticamente significativa en el porcentaje de remoción de DQO, validando las hipótesis planteadas en la investigación respecto a la relevancia de estos factores operativos en la eficacia del proceso de tratamiento (Medina, 2019). La aplicación de esta herramienta estadística no solo permitió verificar la significancia de los efectos principales de cada factor, sino que también facilitó la detección de posibles interacciones entre ellos, proporcionando así una comprensión más integral del sistema estudiado.

Tabla 18. Análisis de varianza en STATGRAPHICS

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón F	Valor P
Efectos principales A: pH	71,9137	2	35,9569	12,17	0,0005
B: Dosificación de O ₃	42,2669	2	21,1334	7,15	0,0052
Interacciones AB	9,18821	4	2,29705	0,78	0,5542
Residuos	53,181	18	2,9545		

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón F	Valor P
Total (corregido)	176,55	26			

Fuente: Chun Orbegozo y Ortiz Vargas (2024).

La interpretación integral de los resultados conduce a conclusiones metodológicas y prácticas de considerable relevancia para el tratamiento de vinazas mediante procesos de oxidación avanzada. Los hallazgos demuestran inequívocamente que la eficiencia del proceso de ozonización aplicado a la vinaza está determinada significativamente por el control preciso del pH y la dosificación de ozono, con condiciones alcalinas (pH 9) y altas dosificaciones de ozono (600 mg/h) maximizando la remoción de DQO. La identificación de estos parámetros óptimos establece bases sólidas para el diseño y escalamiento de sistemas de tratamiento más eficientes y económicamente viables, contribuyendo a resolver uno de los problemas ambientales más críticos asociados a la industria azucarera-alcoholera. Además, la metodología experimental y analítica desarrollada en este estudio constituye un valioso referente para investigaciones futuras orientadas a optimizar procesos de tratamiento de efluentes industriales complejos mediante tecnologías de oxidación avanzada. La confirmación estadística de las relaciones establecidas entre variables operativas y eficiencia de tratamiento valida el enfoque metodológico empleado y fortalece las recomendaciones técnicas derivadas del estudio, las cuales poseen potencial de transferencia a contextos industriales reales para mejorar la sostenibilidad ambiental del sector sucroalcoholero.

Capítulo 5

Hacia una ozonización optimizada: síntesis de condiciones y perspectivas

Factores clave en la remoción de DQO y color en el tratamiento de vinazas

El DQO hace referencia a la cantidad de oxígeno necesario para degradar las sustancias tanto orgánicas como inorgánicas principalmente en los efluentes como medida de contaminación presente.

En concordancia con lo expuesto por Apaza y Laiza (2022), un aumento de pH (Superior a 7) y una dosificación de ozono adecuada favorece la remoción de DQO en vinazas, como es demostrado en la figura 17, donde se puede observar que se obtienen los mayores valores de remoción a pH 9. Esto se sustenta con la mayor generación de iones hidroxilo que se generan a pH alcalino en la solución de vinaza, de acuerdo con lo expuesto por Robles et al. (2012), donde se expuso que factores como pH (Superiores a 7), dosificación de ozono y temperatura tienen una alta relevancia en la remoción de DQO, especialmente afectada por la alcalinidad de la solución como fue expuesto por los investigadores mencionados y se puede verificar en las figuras 14 a 16.

De la remediación a la valorización: integrando parámetros operativos y catalizadores

En adición, se puede observar en las figuras 5 a 16 que se obtuvieron valores de remoción de DQO en el orden de 7.01% a 13.84% debido a dos factores principales, la dilución realizada de la muestra inicial (1:1.5 para la presente investigación) y el tiempo de dosificación de ozono a la muestra diluida (1 hora), verificándose que es requerido generar mayores volúmenes de dilución en el orden de 1:10 como mínimo para vinaza y aumentar el tiempo de dosificación de ozono a dos horas, en concordancia con lo expuesto por Beltran et al. (1999), que describió el aumento de la remoción de DQO al incrementar el tiempo de exposición a ozono y la dilución del efluente, generando en adición remoción de color.

De acuerdo con Santos et al. (2003), el uso de medios ácidos y alcalinos permiten una disminución de color y aumento de la biodegradabilidad, sin embargo, obtuvieron una reducción de DQO del orden de 16% como se verifica en la presente investigación en las figuras 5 a 16. En adición, el uso de catalizadores (como alumina) permiten una mayor remoción de DQO y color del orden de 60% al aumentar la dosificación de ozono, de acuerdo con lo investigado por Sreethawong y Chavadej (2008).

Conclusiones

Validación Experimental y Fundamentos Químicos del Proceso

La investigación permitió establecer concluyentemente la influencia estadísticamente significativa de ambos parámetros operativos en la eficiencia del proceso, demostrando que el pH y la dosificación de ozono determinan sustancialmente los porcentajes de remoción de DQO alcanzados, con un nivel de confianza del 95% que valida robustamente estos hallazgos. Esta correlación directa entre las variables operativas y la efectividad del tratamiento encuentra sustento en los mecanismos químicos fundamentales que gobiernan los procesos de ozonización, particularmente en lo que respecta a la generación de radicales hidroxilo (OH^\bullet) en medio alcalino, especies altamente reactivas que potencian significativamente la degradación de compuestos orgánicos complejos presentes en la vinaza (Castañeda, 2014). La concordancia de estos resultados con los antecedentes investigativos consultados refuerza la validez externa del estudio y consolida el cuerpo de conocimiento existente sobre la aplicación de procesos de oxidación avanzada para el tratamiento de efluentes de alta carga orgánica. La influencia positiva de dosificaciones crecientes de ozono puede atribuirse al principio fundamental de transferencia de masa, donde mayores concentraciones del agente oxidante favorecen los fenómenos de difusión y contacto intermolecular con

los sustratos contaminantes, facilitando así reacciones de oxidación más completas y eficientes.

Optimización de Parámetros Operativos y Potencial de Escalamiento

Los resultados demostraron consistentemente que valores de pH por encima del punto neutro favorecen significativamente la remoción de DQO, observándose el máximo desempeño del sistema en condiciones alcalinas (pH 9) independientemente de la dosificación de ozono aplicada. Este comportamiento diferencial responde a los distintos mecanismos de reacción que predominan según el pH del medio, donde en condiciones alcalinas se favorece la descomposición catalítica del ozono generando radicales hidroxilo, especies oxidantes con potencial redox sustancialmente superior ($E^\circ = 2.8$ V) al del ozono molecular ($E^\circ = 2.07$ V) y con carácter no selectivo que amplía el espectro de compuestos susceptibles de degradación (Pelayo, 2018). Experimentalmente se constató que la combinación de pH alcalino y máxima dosificación de ozono evaluada (600 mg/h) generó los porcentajes de remoción más elevados, estableciendo una relación directamente proporcional entre la concentración de agente oxidante y la eficiencia de tratamiento dentro del rango operativo estudiado. Este hallazgo posee implicaciones prácticas inmediatas para el diseño de sistemas de tratamiento a escala industrial, donde la optimización de estos parámetros podría traducirse en reducciones significativas en los costos operativos y mejoras sustanciales en el desempeño ambiental de las plantas destiladoras. La caracterización precisa de estas relaciones operativas representa un avance concreto hacia la implementación de tecnologías de tratamiento más eficientes y económicamente viables para la gestión de vinazas.

Líneas Futuras de Investigación y Desarrollo Tecnológico

El potencial de optimización identificado en el estudio sugiere la conveniencia de desarrollar investigaciones complementarias orientadas a caracterizar con mayor precisión la cinética del proceso mediante el análisis de tiempos de exposición a diferentes dosificaciones de ozono, lo que permitiría construir curvas de remoción de DQO más detalladas y determinar puntos de saturación u optimización adicionales. Asimismo, se recomienda considerar estudios sistemáticos que evalúen distintos niveles de dilución de la vinaza, parámetro que podría influir significativamente en la eficiencia del proceso al modificar la concentración de sustratos y la transferencia de masa entre fases. Otra línea de investigación promisoria corresponde al estudio específico de la remoción de color en vinazas a diluciones adecuadas, propiedad adicional del proceso de ozonización que podría agregar valor al tratamiento y que responde a la capacidad del ozono para degradar compuestos cromóforos mediante mecanismos de ruptura de dobles enlaces conjugados (Aracil, 2017). La evaluación del efecto de la temperatura en el proceso también merece atención investigativa, dado que este parámetro afecta tanto la solubilidad del ozono como las constantes cinéticas de las reacciones de oxidación.

La integración de tecnologías complementarias representa otra área de desarrollo promisoria, particularmente mediante la utilización de catalizadores homogéneos o heterogéneos que podrían aumentar significativamente la remoción de DQO presente en la vinaza al potenciar la generación de especies oxidantes y reducir los tiempos de tratamiento requeridos. Estudios preliminares con catalizadores basados en metales de transición como el hierro, manganeso o cobre han mostrado resultados alentadores en la degradación de compuestos recalcitrantes mediante procesos catalíticos similares (Aguiar et al., 2021). Finalmente, se recomienda explorar sinergias mediante la combinación de tratamientos de ozonización con procesos biológicos en esquemas secuenciales, donde la ozonización preliminar podría

aumentar la biodegradabilidad de los compuestos refractarios presentes en la vinaza, facilitando su posterior degradación en sistemas biológicos convencionales. Esta aproximación híbrida podría ofrecer ventajas significativas en términos de eficiencia global y costos de tratamiento, representando una línea de investigación prioritaria para el desarrollo de soluciones tecnológicas integrales y sostenibles para la gestión de este efluente de alta carga contaminante.

Referencias

- Aguiar, C., Bolaños, M., De Moura, A., Martins, M., y Salla, M. (2021). Influencia de los catalizadores en la ozonización de agua residual sintética. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37(1), 201-209.
- Alfaro, B., y Aranda, C. (2022). *Influencia de la concentración de ozono y pH en la remoción de sulfuros en efluentes de pelambre de curtiduría* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo].
- Apaza, W., y Laiza, J. (2022). *Influencia del ozono y pH en la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno de efluentes de pelambre de curtiduría* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo].
- Aqualimpia. (n.d.). Pagina web. <https://n9.cl/nhipf>
- Aracil, J. (2017). *Diseño de reactores de burbujeo para el tratamiento de aguas residuales mediante ozono* [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia].
- Beltrán, F., García, J., y Álvarez, P. (1999). Wine distillery wastewater degradation. 1. Oxidative treatment using ozone and its effect on the wastewater biodegradability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(9), 3911-3918. <https://doi.org/10.1021/jf981262b>
- Blas, F., y Conislla, R. (2021). *Remoción de sólidos totales disueltos y turbidez mediante electrocoagulación y ozonificación de aguas residuales de destilería* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao].
- Blas, F., y López, P. (2022). *Procesos de oxidación avanzada en la remoción de la demanda química de oxígeno en aguas residuales industriales* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo].
- Campoverde, O. (2019). *Tratamiento de aguas residuales de una empresa industrial de congelados* [Proyecto de pregrado, Universidad de Piura].
- Cardona, C., Sánchez, O., Montoya, M., y Quintero, J. (2005). Simulación de los procesos de obtención de etanol a partir de caña de azúcar y maíz. *Scientia Et Technica*, XI(28), 187-192.

- Castañeda, A. (2014). *Procesos de oxidación avanzados aplicados en el tratamiento de aguas de la industria del petróleo* [Proyecto de especialización, Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”].
- Chun Orbegozo, K. L. D., & Ortiz Vargas, A. J. (2024). *Influencia del pH y concentración de ozono en la eliminación del DQO presente en residuos de la industria azucarera – Vinaza* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo].
- Diario Oficial El Peruano.* (2017). Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM.
- Fernández, J., y Suca, J. (2020). *Uso de dos sistemas de tratamiento para mejorar la calidad de las aguas residuales de peletizados de plásticos, Huarochirí-2020* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo].
- Gandini, M., y Zúñiga, V. (2013). Caracterización ambiental de las vinazas de residuos de caña de azúcar resultantes de la producción de etanol. *Dyna*, 80(177), 124-131.
- García, S., y Meza, Y. (2021). *Aplicación de las microburbujas/ozonización/ultrasonido y plasma en el tratamiento de aguas residuales: Revisión sistemática 2021* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo].
- González, J., Buedo, S., Prado, F., y Álvarez, S. (2018). Efecto de la vinaza sobre el crecimiento y productividad de la soja (*Glycine max*) en condiciones semicontroladas. *Boletín de la Sociedad Argentina Botánica*, 53(4), 1-10. <http://dx.doi.org/10.31055/1851.2372.v53.n4.21982>
- Hernández, N., Bejarano, S., Mena, N., y Machuca, F. (2019). Tratamiento de aguas residuales provenientes de estaciones de gasolina mediante ozonización catalítica. *Ingeniería y Competitividad*, 21(1), 23-24. <https://doi.org/10.25100/iyc.v21i1.7652>
- Ibarra, R., León, D., y Osoria, A. (2019). Caracterización físico-química de vinazas de destilerías. *Revista Cubana de Química*, 31(2), 246-257.

- Marin, E., y Gonzalez, F. (2018). *Influencia de la concentración de H₂O₂ y densidad de corriente en la remoción de color y DQO de la vinaza mediante electro-Fenton* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo].
- Martín, M., Fernández, J., Martín, A., y García, I. (2003). Ozonation of vinasse in acid and alkaline media. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 78(11), 1121-1127. <https://doi.org/10.1002/jctb.908>
- Medina, C. (2019). *Estudio de la ozonización de la vinaza como tratamiento complementario para la reducción de la carga iónica* [Tesis de maestría, Universidad Tecnológica Nacional].
- Merino, D., y Valderrama, J. (2017). *Influencia de la temperatura y DQO en el tratamiento anaeróbico de vinazas de Cartavio Rum Company usando un reactor UASB* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo].
- Pelayo, D. (2018). *Procesos de oxidación avanzada: Avances recientes y tendencias futuras* [Proyecto de pregrado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones].
- Reis, C., Bento, H., Alves, T., Carvalho, A., y Castro, H. (2018). Vinasse treatment within the sugarcane-ethanol industry using ozone combined with anaerobic and aerobic microbial processes. *Environments*, 6(1), 1-13. <https://doi.org/10.3390/environments6010005>
- Robles, V., Galíndez, J., Rinderknecht, N. y Poggi, H. (2012). Treatment of Mezcal Vinasses: A Review. *Journal of Biotechnology*, 157(1), 524-546. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2011.09.006>
- Rosales, J. (2020). *Estudio comparativo del comportamiento de los sistemas de tratamientos de aguas residuales en las poblaciones alto andinas – Provincia de Acobamba* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú].
- Sreethawong, T., y Chavadej, S. (2008). Color removal of distillery wastewater by ozonation in the absence and presence of immobilized iron oxide catalyst. *Journal of Hazardous Materials*, 155(3), 486-493. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.11.091>



Religación

Press

Ideas desde el Sur Global



Religación
Press

ISBN: 978-9942-561-95-4



9 789942 561954