Universidad Nacional de Ingeniería

Área de Conocimiento de Agricultura

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL MÉTODO FOTOCATALÍTICO CON DIÓXIDO DE TITANIO PARA REMOCIÓN DE CARGA MICROBIOLÓGICA EN AGUAS RESIDUALES DE LA EMPRESA VEGYFRUT, UBICADA EN LA CIUDAD DE MASAYA

Trabajo Monográfico para optar al título de

Ingeniero Químico

Elaborado por:

BR. XIMENA GABRIELA MEJÍA GARCÍA
CARNÉ: 2019-0767U

Br. DAYANA MARCELA RUIZ FLORES
CARNÉ: 2019-0894U

Tutor:

MSc. MARIA ESTHER BALTODANO

23 de junio de 2025
Managua, Nicaragua

Universidad Nacional de Ingeniería
Área de Conocimiento de Agricultura
Formas de Culminación de Estudios

REF.DACA.FCE.159.2025
Managua, 14 de mayo del 2025

Bachilleres

XIMENA GABRIELA MEJIA GARCIA / 2019-0767U
DAYANA MARCELA RUIZ FLORES / 2019-0894U

Estimados (@) Bachilleres:

Es de mi agrado comunicarles que he constituido el Tribunal examinador para la -Pre-Defensa de su trabajo de Monografía titulado: **"ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL METODO FOTOCATALITICO CON DIOXIDO DE TITANIO PARA REMOCION DE MATERIA ORGANICA EN AGUAS RESIDUALES DE LA EMPRESA VEGYFRUT, UBICADA EN LA CIUDAD DE MASAYA."**. La que se realizará el día, jueves 5 de junio 2025, en la sala de Laboratorio de Operaciones Unitaria.

Pres: MSc. Wilfredo Varela Fonseca (PAIQ)
Sec: MSc. Johana Lisseth O´connor Mendoza (PAIQ)
Voc: MGPD. Silvano Enrique Cruz Sánchez (PAIQ)

Hora: 9:00 AM

Asimismo, les comunico que el tutor está en pleno derecho de asistir a la Pre-Defensa. Los Documentos después del acto de Pre-Defensa deberán ser entregados a los sustentantes para realizar correcciones.

Sin otro particular, me despido.

Atentamente,

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
SECRETARIA ACADÉMICA - DACA
RECIBIDO
Nombre: Mary
Fecha: 15-05-25
Hora 8:54 pm

MSc. José Mamerto Méndez Ubeda
Director de Área de Conocimiento de Agricultura
DACA

CC: Archivo
-**Tutor MSc. María Esther Baltodano**
- **MSc. Helia Vanessa Taleno Oporta / Secretaria Académica DACA**

Universidad Nacional de Ingeniería
Área de Conocimiento de Agricultura
Formas de Culminación de Estudios

REF.DACA.FCE.199.2025
Managua, 11 de junio del 2025

Bachilleres

XIMENA GABRIELA MEJIA GARCIA
DAYANA MARCELA RUIZ FLORES

Estimado (a) Bachiller:

En atención a su solicitud de autorización para ajustar al tema de la monografía titulada *"Estudio de la influencia del método fotocatalítico con dióxido de titanio para remoción de materia orgánica en aguas residuales de la empresa Vegyfrut, ubicada en la ciudad de Masaya"*, donde se evidencio que, durante el desarrollo de la investigación y posterior pre-defensa, debía hacerse una corrección en el título del proyecto. Por lo tanto el Área de Conocimiento de Agricultura aprueba dicho cambio, quedando el nombre de la siguiente manera: "*Estudio de la influencia del método fotocatalítico con dióxido de titanio para remoción de carga microbiológica en aguas residuales de la empresa Vegyfrut, ubicada en la ciudad de Masaya.*

Sin otro particular, mis más fraternos saludos.

Atentamente,

MSc. José Mamerto Méndez Úbeda
Director de Área de Conocimiento de Agricultura
DACA

CC: Archivo
MSc. María Esther Baltodano / Tutor
MSc. Helia Vanessa Taleno Oporta / Secretaria Académica DACA

Universidad Nacional de Ingeniería
Área de Conocimiento de Agricultura
Formas de Culminación de Estudios

REF.DACA.FCE.003.2025
Managua, 15 de enero del 2025

Bachilleres

XIMENA GABRIELA MEJIA GARCIA
DAYANA MARCELA RUIZ FLORES

Estimado Bachilleres:

Es de mi agrado informarles que el PROTOCOLO de su Tema **MONOGRAFICO**, titulado: **"ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL METODO FOTOCATALITICO CON DIOXIDO DE TITANIO PARA REMOCION DE MATERIA ORGANICA EN AGUAS RESIDUALES DE LA EMPRESA VEGYFRUT, UBICADA EN LA CIUDAD DE MASAYA.".** Ha sido aprobado por el Director de Área de Conocimiento de Agricultura.

Asimismo, les comunico estar totalmente de acuerdo, que el **MSc. María Esther Baltodano**. Sea el tutor de su trabajo final.

La fecha límite, para que presenten concluido su documento final, debidamente revisado por el tutor guía será el **15 de julio del 2025.**

Esperando puntualidad en la entrega de la Tesis, me despido.

Atentamente,

MSc. Miguel Antonio Fonseca Chávez
Director de Área de Conocimiento de Agricultura
DACA

CC: Archivo
Tutor – MSc. María Esther Baltodano.
MSc. Helia Vanessa Taleno Oporta / Secretaria Académica DACA

Dedicatoria

Infinita a Dios Padre, por nunca abandonarme y hacerme coincidir en esta vida, con la carrera que hoy finalizo, por darme luz, fuerza y amor.

A mis padres y abuelos, por su sacrificio al obsequiarme la oportunidad de estudiar, así como las herramientas necesarias para llegar a ser quién soy hasta este día y formarme en independencia y esfuerzo.

Agradecimientos

Eternamente agradezco a Dios, mi Señor Jesucristo y mi Madre Santa María, porque con su misericordia, obra y amor, culmino mi primer sueño.

Le doy gracias a mis padres y abuelos, por su apoyo inagotable, especialmente mi abuelo Luis Hugo, quien me acompañaba desde preescolar hasta segundo año de la carrera, y ahora desde el cielo me ve cumpliendo la meta que deseó para mí.

Agradezco a la universidad por ser un refugio, el lugar donde aprendí que las cosas se logran por esfuerzo y fe. Así también y singularmente a nuestra tutora MSc. María Esther Baltodano, por su tiempo y darnos el impulso para completar esta etapa.

A mis amigos, Dayana y Julio, de quienes aprendía todos los días a través de emociones e ideas, formándose en el primer regalo recibido de la carrera. A mi compañero de vida, Diego porque siempre ha creído en mí y me ha enseñado a crecer.

Finalmente, a la niña que vivía soñando con metas que sonaban a fantasía y que hoy se cumplen, una a una, con fe, lágrimas, silencio y alegría.

Br. Ximena Gabriela Mejía García

Dedicatoria

A la Divina Sabiduría que mueve el Sol y las estrellas y hace brotar vida cuando la luz besa lo que el mundo dejó morir. Que el trabajo de nuestras manos perdure, y sea semilla para quienes creen que el mañana puede ser más justo.

Agradecimientos

Te agradezco infinitamente, Padre de amor, y a ti, Virgen María por ser luz que teje los días y sostiene el vuelo de los sueños, por la vida, el bien y el saber.

A mi familia. Gracias, mamá, guardiana de vidas, por enseñarme a sentir y convertir tu cansancio en alas; porque tus manos crean enseñanzas y construyen refugios. Este logro es tan mío como tuyo; tu plan de vida siempre ha valido la pena. Te amo. A mis hermanas, Fernanda y Alisson: su presencia es el camino que acompaña y reconstruye el significado de familia; son el alma y la resiliencia de quienes saben de sueños. Gracias por existir.

A ustedes, Ximena y Julio, compañeros y confidentes. Esta idea nació del pensamiento compartido, de escucharnos unos a los otros. Desde el comienzo y hasta el final, nuestro lugar en la arena del tiempo no sería posible sin sus dones irremplazables.
Creador de burbujas, tardes doradas, Jarood: gracias por desaparecer la tristeza que quema el ánimo a cambio de minutos-instantes e historias que no acaban. Nuestro destino en el tablero nos seguirá contando del futuro que nos aguarda. A mi niño de bolsillo, Cris, la libertad tiene tu nombre: gracias por mostrarme un mundo nuevo, donde la espera es agradable porque termina con tu presencia. Al chico de las estrellas, por llenar tardes de magia, poesía y sonrisas que cargan el cielo. Santiago, tu disposición, tiempo, palabras y consejos las guardamos aún después de tantos años en nuestros corazones. A mis queridos compañeros de pasantías: tres meses cambian un mundo, y ustedes hicieron del mío un país nuevo. A los que callaron y ayudaron, cuyos nombres ahora son un susurro, pero su eco habita en cada logro mío. A mi pequeñita, Mila, alma sin tiempo: sigues en cada paso que doy, como un latido que ya no se oye, pero nunca se va.

Finalmente, a ti, chica del país de las maravillas: gracias por mantenerte viva y aguantar un segundo más. Cada silencio, grito y lágrima demuestra que, con la sensibilidad, eres capaz de salvar el mundo. El mundo es bueno. Y tú también.

Br. Dayana M. Ruiz Flores

Resumen

El tratamiento de aguas residuales con alta carga microbiológica es un desafío crítico en la industria alimentaria, donde métodos convencionales suelen ser insuficientes para cumplir con normativas ambientales. Aunque la fotocatálisis heterogénea con TiO_2 ha demostrado potencial para degradar contaminantes, su aplicación en aguas residuales de procesamiento de frutas —especialmente para inactivar microorganismos patógenos como *coliformes* y *E. coli*— carece de estudios sistemáticos que evalúen simultáneamente la influencia de variables clave como el pH y la concentración del catalizador.

Esta tesis evaluó la efectividad del método fotocatalítico TiO_2 para la remoción de carga microbiológica en aguas residuales de la empresa Vegyfrut mediante un diseño experimental que combinó tres niveles de pH (6, 7, 8) y tres concentraciones de TiO_2 (0.5, 1.0, 1.5 g/L) bajo radiación UV (4 horas), se evaluó la eficacia del método utilizando técnicas microbiológicas estándar (NMP) y análisis estadístico (ANOVA, correlación de Pearson).

Los resultados demostraron que el sistema alcanzó una remoción del 100% de coliformes totales, fecales y *E. coli* en condiciones óptimas (pH 6 y 1.0 g/L de TiO_2), cumpliendo con los límites más estrictos de normativas locales.

Este estudio demuestra que la fotocatálisis con TiO_2 constituye un método validado, eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales industriales con alta carga microbiológica. Al establecer las condiciones óptimas de pH y concentración del catalizador, y al comprobar su eficacia en la eliminación total de microorganismos patógenos, este enfoque supera las limitaciones de los tratamientos convencionales, que suelen ser insuficientes para cumplir con normativas estrictas.

Índice de contenido

I. Introducción 8

II. Objetivos 10

2.1. Objetivo General 10

2.2. Objetivos Específicos 10

III. Marco Teórico 11

3.1. Aguas residuales 11

3.2. Aguas residuales según su origen 11

3.2.1. Aguas residuales domesticas 12

3.2.2. Aguas residuales municipales 12

3.2.3. Aguas residuales industriales 12

3.3. Empresa Vegyfrut S.A. 12

3.3.1. Proceso productivo y generación de aguas residuales en VegyFrut 14

3.4. Parámetros de caracterización de aguas residuales 14

3.4.1. Contaminantes físicos 14

3.4.2. Contaminantes químicos 14

3.4.3. Contaminantes biológicos 15

3.5. Microorganismos indicadores 15

3.5.1. Coliformes totales 15

3.5.2. Coliformes fecales 15

3.5.3. E. Coli 16

3.6. Influencia socioambiental de los contaminantes 16

3.7. Tratamiento de aguas residuales industriales en Nicaragua 17

3.8. Marco regulatorio en Nicaragua de los contaminantes emergentes presentes en la muestra y normativa técnica 18

3.8.1. Decreto ejecutivo N°. 21-2017 18
3.8.2. Norma técnica obligatoria nicaragüense NTON 05 027-05..... 19
3.9. Procesos para la reducción de carga microbiológica. 21
3.10. Procesos para la reducción de contaminantes por oxidación avanzada. 22
3.10.1. Clasificación de los Procesos de Oxidación Avanzada (POA)..... 23
3.10.2. Método de oxidación avanzada fotocatalítica heterogénea 24
3.11. Dióxido de titanio como catalizador en fotocatálisis heterogénea..... 26
3.11.1. Estructura 27
3.11.2. Acción bactericida de la fotocatálisis heterogénea con TiO_2..... 31
IV. Hipótesis 33
V. Metodología 34
5.1. Método de investigación 34
5.2. Tipo de investigación 35
5.3. Nivel o alcance de la investigación 35
5.4. Diseño de la investigación 35
5.5. Población y muestra para análisis de agua..... 37
5.5.1. Población 37
5.5.2. Muestra 37
5.6. Instrumentos para muestreo de datos..... 38
5.6.1. Materiales 38
5.6.2. Reactivos 38
5.6.3. Equipos 39
5.6.4. Instrumentos de recolección de datos 39
5.7. Metodología Experimental 40
5.8. Caracterización inicial del agua residual de la empresa 41

5.8.1. Recolección de la muestra 43

5.9. Determinación de las condiciones favorables para la remoción de carga microbiológica mediante el proceso fotocatalítico 43

5.9.1. Determinación de contaminantes microbiológicos de la muestra 45

5.10. Validación de la efectividad de remoción de carga microbiológica en las aguas residuales en comparación con parámetros de calidad del agua. 51

VI. Resultados y Discusión 52

6.1. Resultados de la caracterización de las aguas residuales 52

6.2. Resultado de la influencia para condiciones favorables del proceso de fotocatálisis heterogénea 53

6.3. Efecto del pH en la concentración de coliformes totales 55

6.4. Efecto del factor de concentración del catalizador y coliformes totales finales 57

6.5. Análisis del proceso de fotocatálisis heterogénea y su influencia en la concentración de coliformes finales 58

6.6. Análisis de correlación de Pearson 60

6.6.1. Para pH vs porcentaje de remoción 60

6.6.2. Para concentración del catalizador vs porcentaje de remoción 63

6.7. Relaciones de señal ruido para cada nivel de las variables 66

6.8. Validación de la efectividad en comparación de los resultados con los parámetros de calidad del agua establecidos por la normativa ambiental vigente 68

6.8.1. *Coliformes Fecales* 69

6.8.2. *Coliformes totales* y *E. coli* 70

6.8.3. Normativa Internacional, OMS 70

6.8.4. Comparación general 71

VII. Conclusiones 72

VIII. Recomendaciones 73
IX. Nomenclatura 75
X. Referencias bibliográficas 76
XI. Anexos 81

Índice de tablas

Tabla 1. Límites permisibles de coliformes fecales, Arto. 24 19

Tabla 2. Criterios según el Tipo de categoría de riesgos 20

Tabla 3. Diseño Experimental para cada muestra 37

Tabla 4. Parámetros de medición para diseño experimental 41

Tabla 5. Caracterización inicial del agua residual de la planta de procesamiento de frutas. 52

Tabla 6. Condiciones experimentales del método Taguchi 54

Tabla 7. ANOVA de un factor pH y coliformes 55

Tabla 8. ANOVA de un factor concentración del fotocatalizador y coliformes 57

Tabla 9. Factor porcentaje de remoción vs. pH y concentración 59

Tabla 10. ANOVA factor porcentaje de remoción vs. pH y concentración 59

Tabla 11. Correlaciones pH vs porcentaje de remoción. 60

Tabla 12. Regresión lineal pH vs porcentaje de remoción 61

Tabla 13. Coeficientes pH vs porcentaje de remoción 61

Tabla 14. Correlaciones pH vs porcentaje de remoción 63

Tabla 15. Regresión lineal concentración del fotocatalizador vs porcentaje de remoción 64

Tabla 16. Coeficientes a concentración del fotocatalizador vs porcentaje de remoción 64

Tabla 17. Relaciones de señal/ruido vs pH 66

Tabla 18. Relaciones de señal/ruido vs concentración del fotocatalizador 67

Tabla 19. Descripción de nomenclatura 75

Tabla 20. Índice NMP y límites de confianza del 95% para varias combinaciones de resultados positivos cuando se utilizan cinco tubos por dilución. 81

Índice de figuras

Figura 1. Macrolocalización empresa VegyFrut 13

Figura 2. Formación de par electrón-hueco en una partícula de TiO_2 26

Figura 3. Estructura cristalina del dióxido de titanio en sus tres estructuras cristalinas: (a) Anatasa, (b) Rutilo y (c) Brookita 28

Figura 4. Diagrama del proceso de fotocatálisis con TiO_2 en mcroorganismos. 32

Figura 5. Lámpara UV de Media Presión, 365 nm 45

Figura 6. Método del NMP para aguas residuales afluente 50

Figura 7. Diagrama de dispersión de porcentaje de remoción vs pH 62

Figura 8. Diagrama de dispersión del catalizador vs porcentaje de remoción. 65

Figura 9. Tubo positivo en medio Caldo Lauril sulfato de sodio. 82

Figura 10. Baño Maria para incubacón. 82

Figura 11. Incubación de tubos con caldo verde brillante para determinación de coliformes totales. 83

Figura 12. pH inicial de la muestra. 83

Figura 14. pH ajustado a 6.00 84

Figura 13. pH ajustado a 7.00 84

Figura 15. Preparación de muestras con catalizador. 84

Figura 16. pH ajustado a 8.00 84

Figura 17. Preparación de medios con catalizador 85

Figura 18. Exposición de las muestras con Catalizador a la luz UV 85

Figura 19. Tubos negativos para *E. coli* 85

Figura 20. Tubo positivo a *E. coli* 86

Figura 21. Preparación de medios de cultivo para someterse a autoclave 86

I. Introducción

El tratamiento de aguas residuales es uno de los desafíos más importantes en la gestión ambiental, especialmente en sectores industriales como el de procesamiento de alimentos, donde se generan grandes volúmenes de efluentes con alta carga orgánica y microbiológica. En Nicaragua, la falta de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas residuales ha llevado a la contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos, afectando tanto la salud pública como los ecosistemas locales (Portal del SICA, 2013). En este contexto, la empresa Vegyfrut, dedicada al procesamiento de frutas y vegetales en la ciudad de Masaya, representa un caso en relevancia, ya que sus aguas residuales son descargadas directamente a los cauces aledaños sin ningún tipo de tratamiento previo.

La problemática de las aguas residuales industriales no solo se limita a la contaminación ambiental, sino que también tiene implicaciones socioeconómicas y de salud pública. La presencia de microorganismos patógenos, como coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia Coli* (*E. coli*), en los efluentes industriales, representa un riesgo significativo para las comunidades cercanas, ya que estos microorganismos pueden causar enfermedades gastrointestinales y otras infecciones (Gómez Moreno et al., 2007). Además, la descarga de aguas residuales sin tratar contribuye a la degradación de los ecosistemas acuáticos, afectando la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que estos proveen.

Ante esta situación, es urgente implementar tecnologías eficientes y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales en la industria alimentaria. Una de las alternativas más prometedoras es el uso de procesos de oxidación avanzada (POA), específicamente la fotocatálisis heterogénea, que utiliza catalizadores como el dióxido de titanio (TiO_2) para degradar contaminantes orgánicos e inactivar microorganismos patógenos en presencia de luz ultravioleta (UV) o solar (Garcés et al., 2004). Este método se destaca por su baja toxicidad, sostenibilidad y capacidad

para minimizar la generación de subproductos nocivos, lo que lo convierte en una opción viable para el tratamiento de aguas residuales en industrias como la de Vegyfrut.

Dentro del enfoque y alcance de este estudio se incluyen la caracterización de las aguas residuales, la determinación de las condiciones óptimas para la aplicación del proceso fotocatalítico y la validación de su eficacia en la remoción de contaminantes, comparando los resultados con los estándares de calidad del agua establecidos por la normativa ambiental vigente en Nicaragua.

Esta investigación además de resolver un problema ambiental incursiona en el estudio de aplicación de fotocatálisis heterogénea para resolver un problema latente en la industria alimentaria. Aunque existen investigaciones previas sobre el uso de TiO_2 en el tratamiento de aguas residuales, la mayoría se ha centrado en otros sectores industriales, como el textil o el farmacéutico (Escuadra et al., 2013). Por lo tanto, este estudio contribuye a futuras investigaciones en el conocimiento científico y proporciona información valiosa para la implementación de tecnologías sostenibles en el tratamiento de aguas residuales en Nicaragua.

II. Objetivos

2.1. Objetivo General

- Evaluar la efectividad del método catalítico utilizando dióxido de titanio (TiO_2) en la remoción de carga microbiológica*, Coliformes Totales*, *Fecales* y *E. coli*, presente en las aguas residuales de la empresa Vegyfrut, ubicada en la ciudad de Masaya.

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las aguas residuales generadas por la empresa Vegyfrut, determinando los niveles iniciales de carga microbiológica en conjunto a los parámetros de calidad del agua relevantes para el proceso de tratamiento.

- Determinar las condiciones favorables para la remoción de carga microbiológica mediante aplicación del proceso fotocatalítico con TiO_2, evaluando variables como concentración de TiO_2 y *pH*.

- Validar la efectividad de remoción de carga microbiológica en las aguas residuales tratadas con el método fotocatalítico con TiO_2, comparando los resultados con los parámetros de calidad del agua establecidos por la normativa ambiental vigente.

III. Marco Teórico

A continuación se desarrolla un análisis estructurado en cuatro ejes interrelacionadas: se inicia con la clasificación y composición de las aguas residuales, base fundamental para comprender su complejidad; continúa con el estudio de los contaminantes microbiológicos de mayor impacto sanitario, enfatizando en coliformes y patógenos emergentes; incorpora el marco regulatorio aplicable, incluyendo las normativas NTON 05-027-05 y Decreto 21-2017 que establecen los parámetros microbiológicos permisibles; y culmina con los procesos avanzados de tratamiento, donde la fotocatálisis heterogénea con TiO_2 demuestra su viabilidad técnica al lograr remoción microbiana completa dentro de los estándares legales más rigurosos, superando las limitaciones de los métodos convencionales en términos de eficiencia y sostenibilidad.

3.1. Aguas residuales

Las aguas residuales, o también llamadas aguas servidas, son aquellas que, por influencia antropogénica, presentan un peligro y deben ser tratadas, ya que contienen gran cantidad de microorganismos patógenos y sustancias peligrosas para el ser humano y el medio ambiente (Amarildo, 2017).

La gestión adecuada de aguas residuales requiere comprender su naturaleza y origen. A continuación, se presenta su clasificación fundamental:

3.2. Aguas residuales según su origen

Las aguas residuales se clasifican según su origen en tres tipos principales. Las domésticas, de origen residencial y comercial que contienen desechos fisiológicos, entre otros, provenientes de la actividad humana; las industriales que resultan del desarrollo de un proceso productivo, incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial, entre otras y las aguas municipales, es decir, aguas residuales domésticas que pueden estar mezcladas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial previamente tratadas (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental-OEFA, 2014).

3.2.1. Aguas residuales domesticas

Son aguas residuales de origen residencial, que transportan desechos fisiológicos procedentes de inodoros (heces y orina humana), que contienen coliformes fecales, sólidos suspendidos y nitrógeno; y desechos de la higiene personal, de la limpieza del hogar y de la cocina, que contienen, carga microbiana, organismos patógenos, materia orgánica, grasas y sólidos suspendidos (Casierra, 2016).

3.2.2. Aguas residuales municipales

También conocidas como aguas servidas, son aguas residuales domésticas que pueden mezclarse con aguas pluviales o aguas residuales industriales previamente tratadas, para ser acogidas a un sistema de alcantarillado combinado (Casierra, 2016).

3.2.3. Aguas residuales industriales

Surgen del desarrollo de un proceso productivo realizado en fábricas e instalaciones industriales, incluidas las operaciones mineras que contienen ácidos, detergentes, aceites y grasas, subproductos de origen animal, vegetal o mineral. Su composición varía mucho en función de las diferentes actividades (Casierra, 2016).

3.3. Empresa Vegyfrut S.A.

La empresa procesadora de frutas Vegyfrut S.A. se encuentra ubicada en el km 19.9 de la Carretera a Masaya, en el municipio de Nindirí, departamento de Masaya, Nicaragua. Sus coordenadas geográficas exactas son 12°00'18.5" de latitud Norte y 86°06'32.3" de longitud Oeste. Ocupa una extensión aproximada de 5 hectáreas. La planta se dedica al procesamiento y empaque de frutas tropicales para mercado nacional, operando en un complejo que incluye:

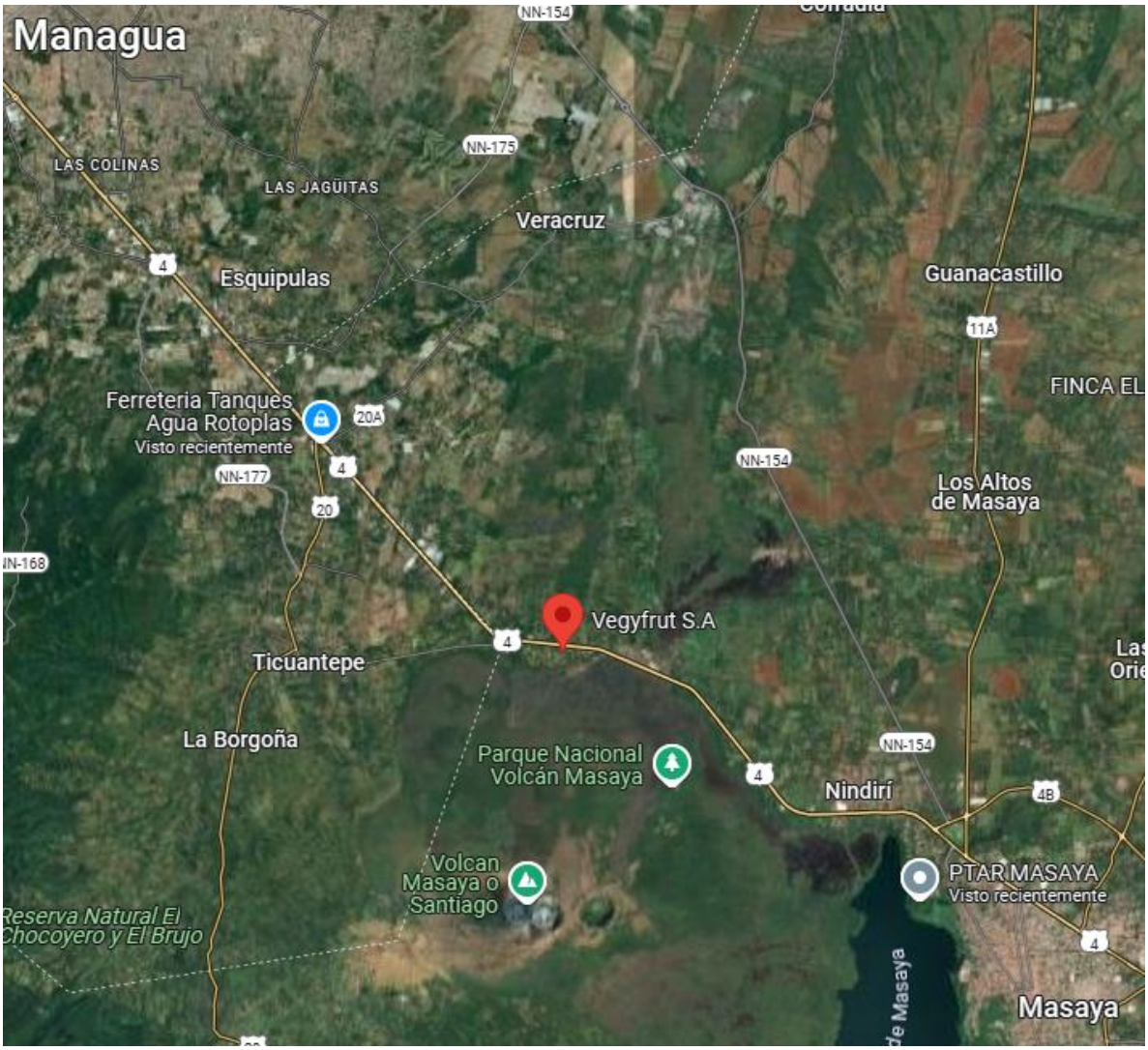
- Áreas de recepción de materia prima.
- Zonas de lavado y procesamiento.

- Instalaciones de empaque y almacenamiento.
- Áreas administrativas

Vegyfrut S.A. se especializa en el procesamiento, empaque y distribución de frutas tropicales como piña, mango, papaya y maracuyá, así como de vegetales como chiltomas, pepinos y ayote.

Figura 1.

Macrolocalización empresa VegyFrut



Fuente: Google Maps. (2025)

3.3.1. Proceso productivo y generación de aguas residuales en VegyFrut

El flujo de operaciones implica la recepción y selección por la llegada de materia prima, el lavado primario (mayor generación de agua residual), en el que se hace uso de chorros de agua a presión, donde al final del proceso, esas aguas se convierten en efluentes depositados hacia los causes aledaños a la zona, donde hay viviendas y negocios cerca que pueden verse afectados por no llevar un control de microorganismos disueltos.

3.4. Parámetros de caracterización de aguas residuales

3.4.1. Contaminantes físicos

Son principalmente sólidos o materiales en suspensión, materia orgánica o líquidos a altas temperaturas vertidos por las industrias como resultado del proceso enfriamiento de ciertos equipos. Estos afectan alteran las características físicas del agua perceptibles por los sentidos humanos como la turbidez, color, sabor, temperatura. Dicho de otra manera, los contaminantes físicos son todos aquellos que alteran las cualidades organolépticas del agua de consumo. (Campbell Cuarezma et al., 2019)

3.4.2. Contaminantes químicos

Estos pueden ser de origen tanto orgánico como inorgánico.

- La contaminación inorgánica consiste en la presencia de nutrientes, detergentes y metales en los cuerpos de agua. Entre los tipos de contaminantes inorgánicos los que representan mayor riesgo son los metales pesados; cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), zinc (Zn).

- La contaminación orgánica se subdivide en contaminantes naturales o sintéticos; los primeros producen mal olor y sabor, mientras que los sintéticos son de origen industrial y son tóxicos, en esta categoría se encuentran los compuestos orgánicos

persistentes; residuos de plaguicidas que en conjunto con los disolventes producidos por las actividades industriales los cuales son persistentes y bioacumulables (Cuarezma, 2019).

3.4.3. Contaminantes biológicos

Un indicativo de contaminación de las aguas residuales es la carga elevada de microorganismos como bacterias patógenas, virus entéricos, helmintos, protozoos y los coliformes totales (su número es proporcional al grado de contaminación fecal). Este grupo de contaminantes está compuesto por una gran diversidad de microorganismos patógenos como bacterias entero-patógenas (*E. coli*, Salmonella, Legionella, entre otras.), protozoo y helmintos parásitos (Toxoplasma, Giardia, Entamoeba, Schistosomas.) y virus (virus de la hepatitis, norovirus, poliomavirus) (Cuarezma, 2019).

3.5. Microorganismos indicadores

3.5.1. Coliformes totales

Son un grupo de microorganismos indicadores de contaminación fecal y patógenos. Comprenden todos los bacilos aerobios o anaerobios facultativos gramnegativos que no forman esporas, fermentan la lactosa a 35°C ± 1ºC durante un periodo de tiempo de 48 h, produciendo ácido y gas (CO_2). Su origen es principalmente fecal, se encuentran comúnmente en los intestinos de las personas y de animales de sangre caliente. Este grupo de bacterias está conformado principalmente por *Enterobacter, Escherichia, Citrobacter* y *Klebsiella,* pero la bacteria representativa en muchos casos para la evaluación de los coliformes totales es la bacteria *Escherichia coli.* De modo que, para acreditar que el agua es bacteriológicamente segura, es necesario indicar su ausencia (Pantoja, 2015).

3.5.2. Coliformes fecales

Los coliformes fecales son contaminantes comunes del tracto intestinal tanto del hombre como de los animales de sangre caliente; están presentes en el tracto

intestinal en grandes proporciones, permanecen por más tiempo en el agua que las bacterias patógenas y se comportan de igual manera que los patógenos en los sistemas de desinfección. En la inactivación de los coliformes fecales se deben tener en cuenta factores ambientales como, la humedad, temperatura, luz ultravioleta, pH, ya que estos microorganismos al no encontrarse en un ambiente favorable y al no obtener los nutrientes necesarios para su crecimiento se hacen más susceptibles a la inactivación (Gómez Moreno et al., 2007).

3.5.3. E. coli

Escherichia coli es una bacteria anaerobia abundante en el microbiota intestinal. Son bacilos gramnegativos, su cubierta está compuesta por la membrana externa y la membrana citoplasmática y, entre ellas, se encuentra el espacio periplásmico formado por peptidoglucanos, esta estructura le da a la bacteria su forma y rigidez, y gracias a ello puede tolerar presiones osmóticas relativamente altas, poseen metabolismo respiratorio y fermentativo, y su movilidad es por medio de flagelos. Normalmente, crece a temperaturas entre 35 a 43°C, si la temperatura es inferior a 7°C su crecimiento puede inhibirse; de igual manera, a temperaturas superiores a 70°C se vuelven muy sensibles promoviendo su inocuidad.

Otro parámetro que tiene un papel fundamental es el pH, valores entre 6 y 7.2 favorecen su desarrollo y crecimiento, y a valores de pH por debajo de 3.8 y por encima de 9.5 inhibe su crecimiento, evitando su proliferación (Ingaruca, 2021).

3.6. Influencia socioambiental de los contaminantes

Si las aguas residuales de la industria de alimentos a manera global, contaminadas con estos microorganismos, son descargadas sin tratamiento adecuado en ríos, lagos o el mar, pueden causar la contaminación de estos cuerpos de agua. Esto no solo afecta la vida acuática, sino que también puede impactar negativamente en los ecosistemas locales, alterando la biodiversidad y los ciclos naturales (Amarildo, 2017).

Los trabajadores de la industria alimentaria que manipulan aguas residuales contaminadas, así como las personas que habitan en las cercanías de plantas de tratamiento y producción, están en riesgo de exposición a estos microorganismos, lo que podría llevar a infecciones gastrointestinales u otras enfermedades transmitidas por el agua, ya sea por manipulación directa o por olores generados a lo largo del recorrido que realiza la corriente desde que es desechada, hasta llegar a puntos de cuerpos de agua.

El tratamiento adecuado de aguas residuales para remover estos microorganismos es costoso. Las industrias que no cumplen con los estándares de tratamiento pueden enfrentar multas y sanciones, además de tener que invertir en tecnologías más avanzadas para el tratamiento de aguas. La presencia de bacterias como *E. coli* en aguas residuales, puede facilitar la transferencia de genes de resistencia a antibióticos, lo cual es una preocupación creciente a nivel global, afectando más a nivel económico y en relaciones comunitarias.

La industria alimentaria puede implementar tecnologías de tratamiento avanzado que no solo eliminen los contaminantes micro orgánicos, sino que también permitan la reutilización del agua tratada en procesos industriales, reduciendo la huella hídrica.

3.7. Tratamiento de aguas residuales industriales en Nicaragua

El tratamiento de aguas residuales, o también conocido como depuración de aguas residuales, consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que buscan eliminar los contaminantes y diferentes tipos carga microbiana, presentes en el agua resultante del uso humano o de otros usos principalmente provenientes del área industrial ligadas al ámbito ambiental y alimenticio (Amarildo, 2017).

El tratamiento de aguas en Nicaragua es un tema relevante debido a varios factores, incluyendo la disponibilidad limitada de agua potable, la contaminación de fuentes de agua y la necesidad de mejorar la infraestructura de tratamiento.

Nicaragua cuenta con infraestructura limitada para el tratamiento de aguas residuales. Muchas ciudades y comunidades arraigadas con sectores industriales carecen de plantas de tratamiento adecuadas, lo que resulta en la descarga directa de aguas residuales sin tratar en cuerpos de agua cercanos y causes, influyendo a gran medida en los niveles de contaminación. En 2021, ENACAL reportó 21 PTAR operativas a nivel nacional, principalmente en ciudades principales (Managua, León, Granada).

Por otro lado, en cuanto a la capacidad de tratamiento, antes del 2007 la capacidad de tratamiento de aguas era de 66 mil m^3, al 2023 se pasó a 341 mil m^3, y se espera al 2030 llegar a 726 mil m^3, mediante la reducción de la eliminación de la contaminación, eliminación del vertimiento y la reducción al mínimo de la descarga de materiales y productos químicos peligrosos. (UNAN, 2025).

3.8. Marco regulatorio en Nicaragua de los contaminantes emergentes presentes en la muestra y normativa técnica

3.8.1. Decreto ejecutivo N°. 21-2017

El Decreto Ejecutivo N°. 21-2017 es un reglamento nicaragüense que establece las disposiciones para la regulación de los vertidos de aguas residuales provenientes de actividades domésticas, industriales, comerciales, agroindustriales y de servicios a cuerpos receptores y sistemas de alcantarillado sanitario.

Esto se logra mediante la definición de límites o rangos máximos permisibles para los vertidos, en cumplimiento con la Ley No. 217, Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales y su Reglamento. En el Capítulo V, "De los Vertidos Provenientes de Sistemas de Tratamiento a Cuerpos Receptores", se detalla específicamente cómo deben manejarse estos vertidos para cumplir con las normativas vigentes. El artículo 24 especifica los requisitos y procedimientos que deben seguirse para garantizar que los vertidos no superen los límites permisibles,

promoviendo así un manejo responsable y sostenible de los recursos hídricos de la siguiente manera:

Artículo 24. Límite Permisible de Coliformes Fecales. El límite máximo permisible de Coliformes Fecales se regirá por medio del Principio de Gradualidad, con el objetivo de lograr la aplicación de la Mejor Tecnología de Practica Disponible, para responder de manera progresiva a la disminución de la contaminación provenientes de las descargas de aguas residuales, siempre y cuando el vertido no se deposite a cuerpos de agua donde se afecte la salud humana (manteniendo los rangos establecidos por el Ministerio de Salud). Se establecen los siguientes límites y periodos de tiempo:

Tabla 1.

Límites permisibles de coliformes fecales, Arto. 24

Período de tiempo	2017-2022	2023-2026	2017-2029
Coliformes Fecales	(1×10^5)	(1×10^4)	(1×10^3)

Fuente: Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales. (2017)

En caso de realizar el reúso de los vertidos tratados, se regirá por lo establecido en la NTON 05-027-05 Norma Técnica Ambiental para Regular los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales y su Reúso, publicada en La Gaceta, Diario Oficial No. 90 del diez de mayo del año 2006.

3.8.2. Norma técnica obligatoria nicaragüense NTON 05 027-05

A continuación, se presenta una tabla que resume los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense para Regular los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales y su Reúso, Norma Técnica NTON 05 027-05. Esta norma define diferentes categorías de agua (A, B y C) y los requisitos específicos para cada una, garantizando que el tratamiento y reúso de las

aguas residuales cumplan con los estándares de calidad necesarios para su seguridad y efectividad.

Asimismo, la tabla proporciona una referencia clara y estructurada de los límites permisibles para cada categoría, lo que facilita la aplicación práctica de la norma y asegura que los sistemas de tratamiento cumplan con los estándares regulatorios. Al seguir estos límites, se garantiza que las aguas residuales tratadas sean seguras para su reutilización en diferentes contextos, minimizando riesgos de contaminación y promoviendo una gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos.

Tabla 2.

Criterios según el Tipo de categoría de riesgos

Parámetros	Límites máximos permisibles según categoría		
	A	B	C
DBO5 (mg/l)	120	200	-
Coliformes Fecales NMP / 100 ml	1×10^3	1×10^4	1×10^5
Huevos de Helmintos (cada 100 ml)	0	1	1
Nitrógeno Total (mg/l)	15	15	15
Fósforo Total (mg/l)	5	5	5
Tasa de Adsorción de Sodio	6	6	6
Conductividad Eléctrica en dS/m	4 (200mo)	4 (200mo)	4 (200mo)

NMP: Número más Probable, mg/l: miligramos por litro, dSm: DeciSiemens por metro, (mo): Micromhos / cm.

Fuente: Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales. (2006)

3.9. Procesos para la reducción de carga microbiológica.

La eliminación de microorganismos patógenos en aguas residuales es fundamental para proteger la salud pública y el medio ambiente. Entre los métodos más utilizados se encuentran los tratamientos físicos, químicos y biológicos, cada uno con sus ventajas y limitaciones.

Los procesos físicos como la filtración emplean medios porosos para retener bacterias y partículas. Según Metcalf & Eddy (2014), este método es eficaz para remover protozoos como Giardia y Cryptosporidium, aunque requiere mantenimiento constante de los filtros. Otro proceso físico ampliamente implementado es la desinfección con luz ultravioleta (UV), que inactiva microorganismos al dañar su material genético. Asimismo, estudios de Bolton & Cotton (2008) demuestran que con dosis adecuadas se logra eliminar el 99.9% de bacterias y virus, siendo especialmente útil en plantas de tratamiento medianas y grandes.

Entre los métodos químicos, la cloración sigue siendo uno de los más comunes por su bajo costo y efectividad contra coliformes. Sin embargo, la Organización Mundial de la Salud (2017) advierte sobre la formación de subproductos tóxicos como los trihalometanos (THMs) cuando el cloro reacciona con materia orgánica. Alternativas como el ozono ofrecen mayor poder oxidante y eliminan microorganismos resistentes al cloro, aunque su implementación requiere mayor inversión inicial (Von Gunten, 2003). La fotocatálisis con dióxido de titanio (TiO_2), como se estudió en esta investigación, emerge como una tecnología prometedora al combinar radiación UV con un catalizador para generar radicales libres que degradan patógenos sin producir residuos peligrosos (García et al., 2020).

Asimismo, la adsorción es uno de los métodos físicos más versátiles, utilizando materiales con alta área superficial como carbón activado (500-1500 m^2/g), zeolitas o arcillas modificadas. Estos adsorbentes capturan contaminantes orgánicos a través de fuerzas de Van der Waals, interacciones electrostáticas o enlaces químicos (Weber , 1996). El carbón activado granular (CAG) es especialmente

eficaz para compuestos no polares como bencenos y pesticidas, mientras que las zeolitas modificadas con cationes metálicos pueden adsorber moléculas polares y metales pesados. (Weber , 1996). Un aspecto crítico es la capacidad de regeneración de estos materiales, que puede realizarse mediante lavado con solventes o tratamiento térmico, aunque esto incrementa los costos operativos (Asim et al, 2012).

3.10. Procesos para la reducción de contaminantes por oxidación avanzada

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POAs) o procesos avanzados de oxidación se caracterizan por aprovechar la alta reactividad del radical hidroxilo ($OH^{\cdot}$) como agente oxidante (no confundir el radical con el ion hidroxilo, OH^-) para oxidar los microorganismos disueltos en el agua hasta su mineralización. En otras palabras, los POAs son procesos de oxidación de microorganismos a través de los radicales hidroxilos hasta convertirla en dióxido de carbono y agua o al menos en compuestos menos peligrosos.

En los tratamientos convencionales de aguas residuales tenemos a los tratamientos primarios que sirven para remover carga microbiana en suspensión, a los tratamientos secundarios que sirven para la remoción de materia orgánica biodegradable en solución o suspensión y a los tratamientos ternarios que se emplean para eliminar los sólidos remanentes que quedan del tratamiento anterior; en los tratamientos secundarios y ternarios también se pueden incluir los procesos de desinfección.

Los Procesos de Oxidación Avanzada son aprovechados para el tratamiento de aguas residuales domésticas e Industriales cuando no son efectivos los tratamientos convencionales o como complemento de estos para tratar a contaminantes orgánicos más complejos que no han podido ser removidos; como son por ejemplo los contaminantes emergentes recalcitrantes como fármacos, aditivos de la industria textil, cosmética, los plastificantes, industria alimenticia, etc.

3.10.1. Clasificación de los Procesos de Oxidación Avanzada (POA)

Los procesos de oxidación avanzada se tratan de una diversa familia de métodos para la remoción de contaminantes y patógenos microbiológicos en las aguas residuales de distintas áreas industriales, en los que se incluyen todos los procesos catalíticos y no catalíticos que utilizan una elevada o determinada cantidad de OH, y que se diferencian entre sí, por la forma en que generan dicho radical. (Peña, 2020)

La clasificación de los POAs se puede dividir en dos grandes bloques, los homogéneos y los heterogéneos, también divididos a su vez por el aporte de energía. Esto argumenta que también se pueden catalogar como procesos fotoquímicos y no fotoquímicos, en función del uso de radiaciones luminosas en cada proceso.

Las principales ventajas de estas nuevas tecnologías que pueden tener frente a los métodos convencionales para el tratamiento de aguas residuales industriales son las siguientes (González, 2018).

- Los contaminantes se degradan, no se concentran ni cambian de fase.
- Puede alcanzarse la mineralización total de los contaminantes orgánicos
- No se suelen generar barros o sedimentación que requieran de un post tratamiento y/o eliminación.
- Los diversos reactivos utilizados como oxidantes son sustancias que se descomponen durante el proceso en productos inocuos.
- Útiles para eliminar contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento principalmente el biológico. Mejoran la biodegradabilidad del agua residual, permitiendo acoplar un tratamiento biológico posterior.

Entre los Tratamientos de Oxidación Avanzada podemos incluir a la ozonización (O_3), la ozonización en combinación con peróxido de hidrógeno o agua oxigenada (O_3/H_2O_2), la irradiación ultravioleta (UV), la irradiación ultravioleta con ozono (UV/O_3), la irradiación ultravioleta con agua oxigenada (UV/H_2O_2), la irradiación

ultravioleta con ozono y agua oxigenada (O_3/UV/H_2O_2), los procesos Fenton (Fe^{2+}/H_2O_2), el foto-Fenton, la oxidación electroquímica, y especialmente la fotocatálisis; siendo los últimos tres, los más estudiados en las más recientes investigaciones y estudios científicos por su desarrollo tecnológico y eficiente (Cuenca, 2020).

3.10.2. Método de oxidación avanzada fotocatalítica heterogénea

La fotocatálisis heterogénea es una tecnología avanzada de oxidación que permite la degradación y la mineralización de gran variedad de compuestos orgánicos. El proceso se basa en la excitación de un fotocatalizador sólido, normalmente semiconductor de banda ancha, sumergido en una solución, el cual, mediante la absorción de energía radiante (visible o UV), origina reacciones simultáneas de oxidación y reducción en diferentes zonas de la región interfacial (Garcés, 2004).

Se trata de un material semiconductor capaz de aumentar la velocidad de la reacción de oxidación mediante la absorción de luz de distintas longitudes de onda, ya sea luz ultravioleta o luz solar, siendo capaz de excitarse, de esta forma los electrones de valencia migran dejando su correspondiente hueco, generándose los denominados pares hueco-electrón (Gomez, 2015).

La diferencia con el método de catálisis convencional es el modo de activación del catalizador, ya que la activación térmica es sustituida por una activación fotónica.
El proceso completo de la reacción se describe de la siguiente manera:

- Oxidante: Para que el fotocatalizador se oxide, reciba electrones y no se produzca la recombinación de los pares $h^+ - e^-$, suele emplearse el oxígeno, que en fase gaseosa es muy sencillo de aportar debido a su abundante presencia en el aire, en esta etapa se produce el ion superóxido O_2^-.
- Suministrador de electrones: El grupo OH suele ser el que aporta los electrones en la reacción y más tarde favorece la oxidación de los contaminantes adsorbidos,

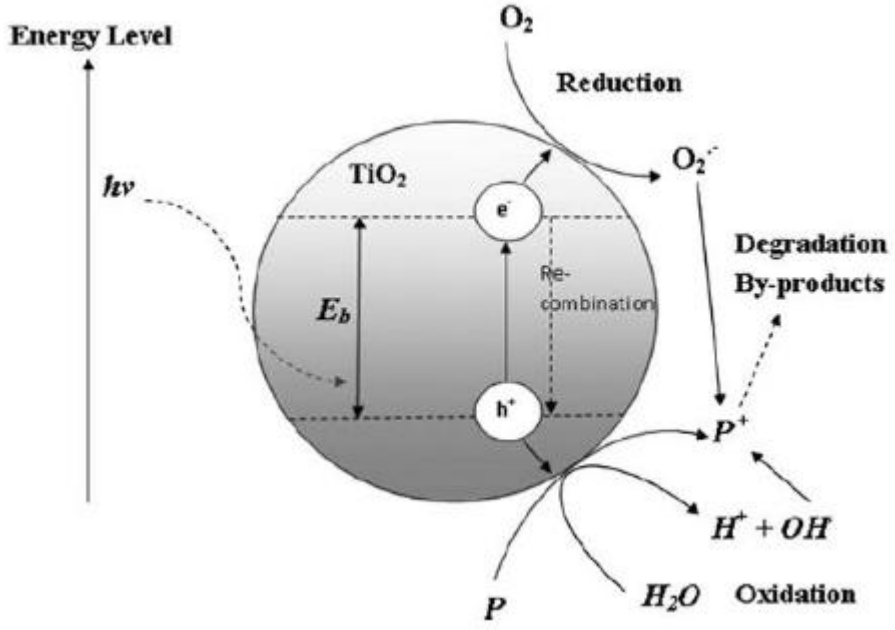
donde las moléculas de agua son adsorbidas en los huecos produciéndose radicales hidroxilos.
- Radiación: El fotocatalizador será excitado al absorber la radiación solar, con una alta longitud de onda o una análoga con la artificial, de manera que se acelera la reacción química de la fotocatálisis (Bermejo, 2018).

Los orbitales moleculares de los semiconductores tienen una estructura de banda. Las bandas de interés en la fotocatálisis son la banda ocupada de valencia, (VB: valence band) y la banda desocupada de conducción (CB: conductance band), separadas entre sí por una energía denominada “distancia energética entre bandas” (band gap; Ebg).

Cuando el semiconductor queda expuesto a una radiación con luz (HV, UV) de mayor energía que la distancia energética entre bandas, un electrón se puede excitar desde la banda de valencia a la banda de conducción, creando un par electrón-hueco en la banda de valencia, cuando la partícula es irradiada con la longitud de onda adecuada. El electrón solitario de la banda de valencia será foto excitado hasta la banda de conducción vacía en femtosegundos (Gardinali, 2010).

Figura 2.

Formación de par electrón-hueco en una partícula de TiO_2



Fuente: Wordsworth. (2016)

La oxidación fotocatalítica es considerada un método eficiente de degradación debido a que la concentración de los contaminantes orgánicos es pequeña y funciona mejor si no superan el valor de 1 gr/l, otra de las ventajas de la fotocatálisis es su nula selectividad que permite que puedan tratar también a los contaminantes no biodegradables. Existen múltiples de estos, fotosensibilizadores tales como: Al_2O_3, ZnO, Fe_2O_3 y TiO_2. Sin embargo, el más usado es el dióxido de titanio como catalizador y se destaca por ser una tecnología capaz de oxidar gran cantidad de compuestos refractarios, además de ser un semiconductor con baja toxicidad, resistencia a la foto corrosión, disponibilidad y efectividad (Escuadra, 2013).

3.11. Dióxido de titanio como catalizador en fotocatálisis heterogénea

El dióxido de titanio (TiO_2) es un compuesto inorgánico ampliamente utilizado en diversas aplicaciones debido a sus propiedades fotocatalíticas únicas. En el contexto de la fotocatálisis heterogénea, el dióxido de titanio actúa como catalizador al acelerar las reacciones químicas mediante la absorción de la luz solar o artificial

UV y la generación de pares de electrones y huecos de electrones en su estructura cristalina (Escuadra, 2013).

La fotocatálisis heterogénea implica la activación de las moléculas de sustrato mediante la interacción con especies reactivas generadas en la superficie del catalizador bajo la irradiación de la luz. En el caso del dióxido de titanio, su estructura cristalina, generalmente en forma de anatasa, rutilo o brookita, presenta una banda prohibida de energía relativamente ancha, lo que le permite absorber luz ultravioleta, visible e incluso infrarroja cercana, dependiendo de su estructura y dopantes (Gomez, 2015).

Cuando el dióxido de titanio absorbe luz, los electrones en su estructura son excitados a un nivel de energía superior, creando pares de electrones y huecos de electrones. Estas especies reactivas pueden participar en varias reacciones químicas superficiales, como la oxidación de contaminantes orgánicos en el agua o la degradación de compuestos orgánicos volátiles en el aire.

3.11.1. Estructura

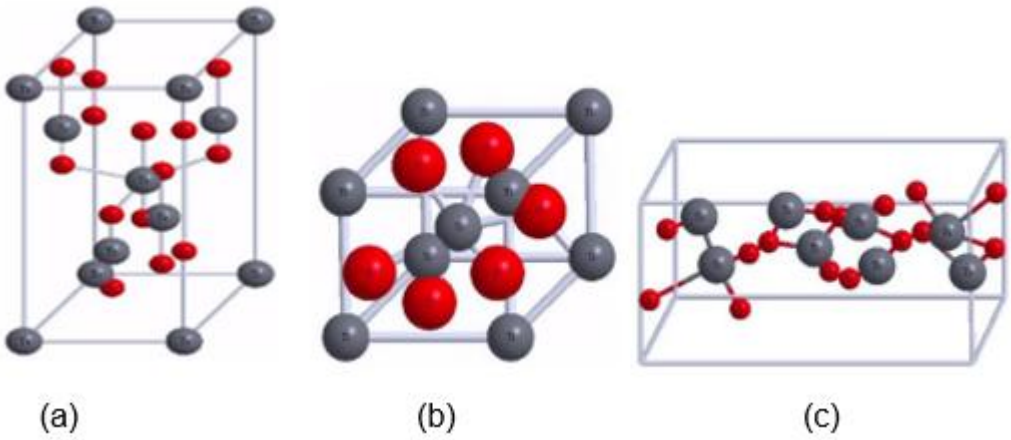
El dióxido de titanio TiO_2 es un compuesto químico inorgánico que consiste en un átomo de titanio en estado de oxidación +4 y dos átomos de oxígeno, formando una estructura cristalina típicamente tetraédrica. El TiO_2 puede encontrarse en tres formas cristalinas principales: anatasa, rutilo y brookita. Cada una de estas formas cristalinas tiene una disposición específica de los átomos de titanio y oxígeno en su red cristalina, lo que resulta en diferentes propiedades físicas y químicas.

La estructura cristalina del dióxido de titanio anatasa es la más comúnmente asociada con sus propiedades fotocatalíticas. En la anatasa, los átomos de titanio están rodeados por seis átomos de oxígeno en una disposición octaédrica, formando una estructura tridimensional. Esta disposición proporciona sitios activos en la superficie del material que son propicios para la adsorción de especies reactivas y la participación en reacciones químicas (Gardinali, 2010).

El TiO_2 es químicamente inerte y estable a altas temperaturas, lo que lo hace adecuado para una variedad de aplicaciones industriales y ambientales, en el caso del tratamiento de agua más específicamente. Posee fácil disponibilidad y bajo costo, ya que es abundante en la corteza terrestre y relativamente económico de producir, lo que lo convierte en un material atractivo para aplicaciones a gran escala.

Figura 3.

Estructura cristalina del dióxido de titanio en sus tres estructuras cristalinas: (a) Anatasa, (b) Rutilo y (c) Brookita



Fuente: Ramírez. (2022)

En la figura 3 se muestra que el TiO_2 exhibe tres polimorfos principales (rutilo, anatasa y brookita), cuyas diferencias estructurales determinan su estabilidad, actividad óptica y potencial tecnológico. Mientras el rutilo domina en aplicaciones industriales por su inercia, la anatasa destaca en fotocatálisis, y la brookita emerge como material prometedor en nanotecnología (Linsebigler, 1995).

La estructura cristalina del rutilo se describe comúnmente mediante cadenas de octaedros de TiO_6 donde el átomo de titanio (catión) se localiza en el centro de la celda unitaria y está rodeado por seis átomos de oxígeno (aniones). En el rutilo cada octaedro está en contacto con 10 octaedros vecinos, dos compartiendo las caras de

los pares de oxígeno y ocho compartiendo las esquinas de los átomos de oxígeno. Tiene seis átomos por celda unitaria y todos los átomos de los mismos elementos son equivalentes por simetrías en las esquinas de un octaedro distorsionado (Bolívar Marín, 2020).

El rutilo destaca como la fase más estable del TiO_2 a altas temperaturas, debido a su estructura cristalina compacta de octaedros TiO_6 interconectados. (Diebold, 2003) Presenta un alto índice de refracción (~2.7) que lo hace ideal como pigmento blanco en pinturas y plásticos, y una banda prohibida de ~3.0 eV que le permite absorber radiación UV con menor fotoactividad que la anatasa (Buxbaum, 2005).

Por otro lado, la brookita, polimorfo ortorrómbico del TiO_2 (grupo espacial Pbca), presenta una estructura única de octaedros TiO_6 que comparten tres aristas, generando una red menos simétrica que el rutilo o la anatasa. Esta configuración explica su banda prohibida intermedia (~3.2-3.4 eV) y su mayor actividad fotocatalítica bajo luz UV, aunque su inestabilidad térmica (>750°C) limita su uso a bajas temperaturas. Estudios recientes destacan su birrefringencia y anisotropía óptica (índice de refracción ~2.6-2.7), propiedades valiosas para aplicaciones optoelectrónicas (Kumar, 2016).

Aprovechando su eficiencia en la generación de cargas fotocatalíticas, la brookita se emplea en degradación de contaminantes y celdas solares sensibilizadas. Su síntesis como nanomaterial ha permitido explorar usos biomédicos, como terapia fotodinámica antitumoral, donde su estructura electrónica favorece la producción de especies reactivas de oxígeno (Naldoni, 2019). Pese a ser menos estudiada que otros polimorfos, sus propiedades únicas la posicionan como material prometedor en tecnologías energéticas y ambientales.

En cambio, el dióxido de titanio, especialmente en fase anatasa, es ampliamente utilizado como fotocatalizador por sus propiedades ópticas y electrónicas, bajo costo, estabilidad química y baja toxicidad, principalmente (Bevilacqua, 2004).

La anatasa, otro polimorfo del TiO_2, cristaliza en el sistema tetragonal y se caracteriza por octaedros de TiO_6 que comparten cuatro aristas, generando una estructura menos compacta que el rutilo, pero más abierta que la brookita. Esta configuración le confiere una banda prohibida de ~3.2 eV, ligeramente mayor que la del rutilo (~3.0 eV) pero similar a la brookita (~3.2-3.4 eV), lo que la hace altamente eficiente en la absorción de luz UV (Ohtani et al, 2010). A diferencia del rutilo, que es termodinámicamente estable, la anatasa se transforma irreversiblemente en rutilo a temperaturas superiores a 600°C, limitando su uso en aplicaciones de alta temperatura (Zhang, 2014).

La anatasa destaca como el polimorfo más fotoactivo del TiO_2 debido a su mayor movilidad de portadores de carga y menor recombinación electrón-hueco comparado con el rutilo y la brookita (Khan et al, 2017). Su superficie expuesta presenta sitios activos ideales para reacciones redox, lo que la hace superior en aplicaciones como la degradación de contaminantes orgánicos y la producción de hidrógeno mediante división fotocatalítica del agua (Liu et al, 2016).

Mientras que el rutilo es preferido por su estabilidad y la brookita por su anisotropía, la anatasa combina una actividad fotocatalítica excepcional con una síntesis más sencilla a escala nanométrica.Las nanopartículas de anatasa son ampliamente utilizadas en fotocatálisis ambiental, recubrimientos autolimpiantes y dispositivos de energía solar, donde su eficiencia supera a la del rutilo y la brookita (Pelaez, 2012). A diferencia de la brookita, que requiere métodos de síntesis complejos, la anatasa puede obtenerse fácilmente mediante sol-gel o hidrólisis, facilitando su escalado industrial.

Sin embargo, su menor estabilidad térmica frente al rutilo y su menor conductividad electrónica comparada con la brookita en ciertas configuraciones, la hacen menos adecuada para aplicaciones que requieran durabilidad extrema o manipulación de cargas en dispositivos optoelectrónicos especializados (Schneider, 2014).

Las nanopartículas de anatasa son ampliamente utilizadas en fotocatálisis ambiental, recubrimientos autolimpiantes y dispositivos de energía solar, donde su eficiencia supera a la del rutilo y la brookita (Pelaez, 2012). A diferencia de la brookita, que requiere métodos de síntesis complejos, la anatasa puede obtenerse fácilmente mediante sol-gel o hidrólisis, facilitando su escalado industrial. Sin embargo, su menor estabilidad térmica frente al rutilo y su menor conductividad electrónica comparada con la brookita en ciertas configuraciones, la hacen menos adecuada para aplicaciones que requieran durabilidad extrema o manipulación de cargas en dispositivos optoelectrónicos especializados (Schneider, 2014).

3.11.2. Acción bactericida de la fotocatálisis heterogénea con TiO_2

La desinfección fotocatalítica con TiO_2 ocurre cuando este semiconductor es activado mediante el proceso fotocatalítico por exposición a la radiación UV con longitudes de onda entre 300 nm > λ > 390 nm, generando especies reactivas oxidantes, formando en la superficie del catalizador TiO_2 los huecos (h+) que reaccionan con los compuestos orgánicos presentes en la pared celular de los microorganismos para formar radicales libres, atacando sus componentes y/o alterando su funcionalidad, provocando daños mortales en diversos microorganismos, dando lugar a un tratamiento eficaz para la inactivación de microorganismos resistentes (Cabañas, 2019).

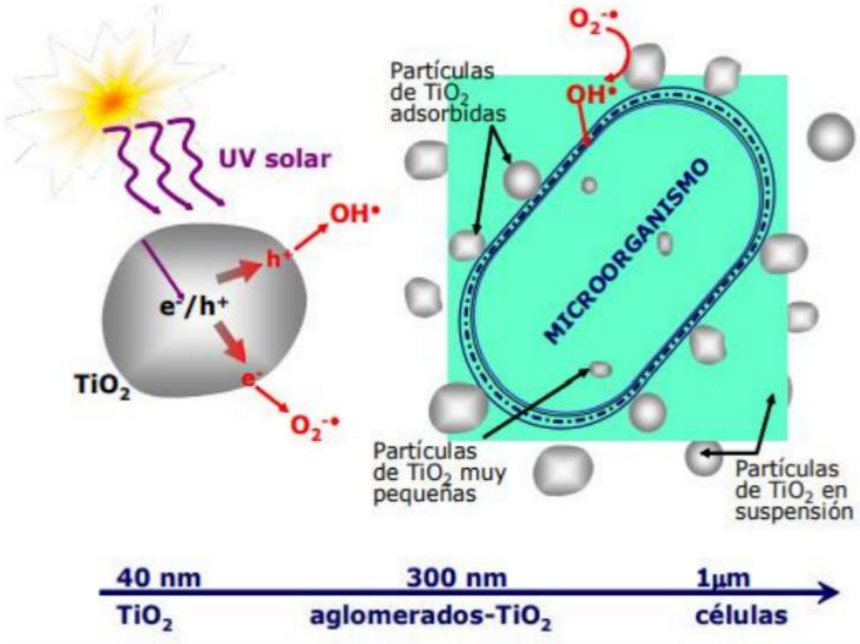
Los daños ocasionados a los microorganismos también ocurren a nivel intracelular, principalmente en el citoplasma. Cuando el TiO_2 entra en contacto con los microorganismos, daña su sistema intracelular, las partículas de TiO_2 atraviesan la membrana plasmática e infieren en el citoplasma, donde suceden las reacciones biosintéticas y degradativas, alterando su funcionamiento y dañando sus componentes internos como el DNA, RNA, ribosomas, entre otros (Jimenez, 2016). Uno de los organismos más usados en los procesos de desinfección como indicador de calidad de agua libre de patógenos es la bacteria Escherichia coli, perteneciente al grupo de las bacterias gramnegativas. El mecanismo de inactivación de las

bacterias E. coli se inicia por exposición solar.

Esta acción provoca la interrupción o disminución de la síntesis de ATP y proteínas, lo que conduce a una reducción gradual del potencial de la membrana citoplasmática, provocando su permeabilidad y una disminución de la captación de glucosa, esto conduce a su inactivación (Ingaruca, 2021).

Figura 4.

Diagrama del proceso de fotocatálisis con TiO_2 en mcroorganismos.



Fuente: *Fernández. (2018)*

Por otro lado, la eficiencia del tratamiento va a depender de algunos factores como el tiempo de irradiación, ya sea mediante la acción del Sol o el uso de lámparas, la concentración del catalizador y el tiempo de permanencia (Jaramillo, 2017).

IV. Hipótesis

- Hipótesis nula (**H_0**): El método fotocatalítico con dióxido de titanio (*TiO_2*) no es efectivo para la remoción de coliformes totales, fecales y *E. coli* en las aguas residuales de la empresa Vegyfrut, independientemente del pH y la concentración del catalizador.

- Hipótesis alternativa (**H_1**): El método fotocatalítico con dióxido de titanio (*TiO_2*) es efectivo para la remoción de coliformes totales, fecales y *E. coli* en las aguas residuales de la empresa Vegyfrut, y su eficacia está influenciada significativamente por el pH y la concentración del catalizador.

V. Metodología

A continuación, se presenta el método de investigación, tipo de investigación y nivel o alcance de la investigación, para describir el enfoque de estudio, como se aplica el estudio y explicar la razón de este, así como el diseño de experimentación.

5.1. Método de investigación

El enfoque es cuantitativo y se ha usado el método científico como método general, a partir de un conjunto de procedimientos que permiten explicar y generar conocimiento de las interrogantes planteadas en este estudio. Se entiende por método científico al proceso de aplicación del método y técnicas científicas a situaciones y problemas teóricos y prácticos concretos en el área de la realidad social para buscar respuestas a ellos y obtener nuevos conocimientos, que se ajusten lo más posible a la realidad (Sierra Bravo, 1983).

Durante el desarrollo de este estudio, se explica el fenómeno de ocurrencia del proceso de fotocatálisis heterogénea usando como catalizador el TiO_2 frente a la concentración de grupo de especies bacterianas coliformes totales, fecales y *E. coli* del agua residual de la empresa VegyFrut en Nindirí, Masaya; considerando como variables la concentración del TiO_2 y el pH. Es así como se ha buscado explicar los periodos o rangos de las variables para determinar su influencia sobre la concentración de coliformes totales, fecales y *E. coli* y con ello poner a prueba las hipótesis planteadas en este estudio.

5.2. Tipo de investigación

Por su finalidad, es de tipo aplicada, que implica el uso de los conocimientos que se adquieren para la resolución de los problemas planteados (Hernandez Sampieri, 2014). Esta metodología ha permitido analizar y estudiar las variables de este estudio para dar respuesta a los diversos cuestionamientos investigados, generando conocimiento con la aplicación directa del proceso fotocatalítico sobre la concentración de coliformes totales, fecales y *E. coli* de agua residual de la empresa VegyFrut en Nindirí, Masaya.

5.3. Nivel o alcance de la investigación

El nivel es correlacional – explicativo, correlacional a razón de que en este estudio se ha medido el grado de asociación de las variables estudiadas, mediante el análisis correlacional Pearson, es explicativa porque da una respuesta de por qué el proceso de fotocatálisis heterogénea influye en la concentración final de coliformes totales, fecales y E. coli (Hernandez Sampieri, 2014).

Se entiende por investigación explicativa a aquellos estudios que pretenden establecer las causas de los hechos o fenómenos objeto de estudio. Con estos diseños, se puede explicar por qué ocurre, en qué condiciones se presenta, o por qué se correlacionan dos o más variables (Hernandez Sampieri, 2014).

5.4. Diseño de la investigación

Se ha utilizado un diseño experimental, ya que, mediante el análisis en laboratorio de microbiología del Programa de Investigaciones de Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente desarrollado en las instalaciones de la Universidad Nacional de Ingeniería, en el año 2024, se han evaluado la variable independiente frente a la variable dependiente, utilizando un método inductivo, considerando también para las pruebas de análisis los parámetros de estudio como pH y concentración del

catalizador.

La estrategia a utilizar ha involucrado el uso del laboratorio de microbiología para someter las muestras tomadas del efluente de la empresa VegyFrut, ubicada en Masaya a un proceso de fotocatálisis heterogénea, utilizando un semiconductor que en este estudio se ha definido el TiO_2, analizando los parámetros que afectan al proceso fotocatalítico como pH y la concentración del catalizador.

En cuanto al tiempo de exposición a la radiación ultravioleta, se ha expuesto por un lapso de 4 horas, la temperatura del laboratorio se ha controlado a un rango mínimo de 15°C y máximo de 25 °C con el fin de lograr óptimos resultados; por otro lado, se tomarán datos iniciales de coliformes totales, fecales y *E. coli* haciendo cultivos mediante la técnica del número más probable. De esta manera, se ha analizado la correlación que existe entre el proceso de fotocatálisis heterogénea y su influencia en la concentración de coliformes totales, fecales y *E. coli* de agua residual de la empresa VegyFrut. Para el análisis correlacional, se han utilizado métodos estadísticos como ANOVA y Pearson.

Tabla 3.

Diseño Experimental para cada muestra

Pruebas	Nivel de pH	Concentración de TiO_2 (g/L)	Tiempo de exposición de la muestra a la radiación UV (horas)
X_1	6	0.5	4
X_2	6	1.0	4
X_3	6	1.5	4
X_4	7	0.5	4
X_5	7	1.0	4
X_6	7	1.5	4
X_7	8	0.5	4
X_8	8	1.0	4
X_9	8	1.5	4

Fuente: Elaboración Propia

5.5. Población y muestra para análisis de agua

Se describe la presente población y muestra de para los análisis que se llevarán a cabo en el laboratorio de microbiología de la Universidad Nacional de Ingeniería, UNI, PIENSA. La población constituida por la empresa y la muestra.

5.5.1. Población

La población está formada por todo el volumen de agua residual de la empresa VegyFrut en Nindirí, Masaya.

5.5.2. Muestra

La muestra está constituida por un volumen de 100 mL, tomada del afluente de la empresa VegyFrut en Nindirí, Masaya. A partir de este volumen, se realizaron 9 experimentos, debido a la interacción de los parámetros de estudio considerando

los rangos para el proceso de fotocatálisis heterogénea, los cuales fueron sometidos a pruebas de laboratorio.

5.6. Instrumentos para muestreo de datos

Se muestran los diferentes instrumentos aplicados a la técnica de muestreo y al seguidamente utilizados para le proceso experimental en el laboratorio, siendo parte fundamental de las herramientas para obtener los primeros datos del análisis.

5.6.1. Materiales

- Tubos de ensayo marca PYREX de 30 mL
- Gradillas
- Pipetas graduadas de vidrio de 5ml
- Asa de inoculación
- Campanas Durham
- Frascos para reactivo graduado de 100 ml con tapón de polietileno, marca Scott Duran.
- Beaker de vidrio graduado de 250 ml, marca PYREX
- Matraz Erlen Meyer de vidrio graduado de 2000 ml, marca Scott Duran
- Agitador magnético
- pH-metro

5.6.2. Reactivos

- Dióxido de titanio
- Lauril Sulfato de sodio
- Medio de verde brillante lactosa bilis
- Medio EC
- Medio EC+MUG
- NaOH (Hidróxido de sodio)
- HCl (Ácido Clorhídrico)
- Agua destilada

- Fosfato dihidrógeno de potasio (KH_2PO_4)
- Cloruro de magnesio hexahidratado ($MgCl_2 * 6\ H_2O$)

5.6.3. Equipos

- Mechero Bunsen
- Incubadora
- pH metro
- Balanza
- Autoclave
- Baño María
- Horno de calor seco
- Plancha de calentamiento
- Lámpara UV de media presión con longitud de onda específica de 365 nm.

En función del uso de la lámpara ultravioleta en el laboratorio, se tiene el tipo de lámpara de Media Presión con 365 nm, o longitud de onda. Esta permite reproducibilidad exacta en las condiciones de irradiación (intensidad, longitud de onda y tiempo de exposición), lo que es crítico para validar la eficacia del método. La luz solar varía en intensidad y espectro según hora del día, clima y estación (Garcés et al., 2004). El TiO_2 (en fase anatasa) tiene un "bandgap" de ~3.2 eV, que requiere luz con $\lambda \leq 387$ nm para excitar electrones y generar radicales hidroxilos (OH) sin ser un peligro cancerígeno o de salud siempre y cuando se utilice protección en ojos y piel. Las lámparas UV-A (365 nm) coinciden perfectamente con este rango, mientras que la luz solar solo contiene 4–5% de UV-A (Schneider et al., 2014).

5.6.4. Instrumentos de recolección de datos

- Bitácoras de registros de campo
- Guías de observación de campo
- Cámara fotográfica

5.7. Metodología Experimental

En la presente sección del estudio, se abarca la caracterización de las aguas residuales de la empresa Vegyfrut, en conjunto con las variables de que influyen en la experimentación y análisis de la muestra. Así también la recolección de la muestra, descripción de las condiciones favorables para la aplicación del método fotocatalítico para determinar la presencia de microorganismos y la validación del mismo.

En la parte experimental, las variables independientes son las siguientes:

- Concentración del catalizador TiO_2: Con base a investigaciones similares, se determinará el intervalo de entre 0.5 g/L – 1.5 g/L para este estudio.
- pH: El TiO_2 es un reactivo anfótero, es decir que puede funcionar adecuada y eficientemente desde pH ácidos hasta básicos. Para este estudio, se evalúan rangos de pH de 6-8.
- El tiempo de exposición para cada muestra se dará por un período de 4 horas efectivas de 10:40 a.m. a 2: 40 p.m. considerando el aprovechamiento directo de irradiación con la lámpara de luz ultravioleta, aumentando la eficacia de catalización. La radiación de la lámpara de luz ultravioleta posee una longitud de onda de 365 nm, como parte de la carga energética que emite directamente sobre la muestra.
- La temperatura se toma como un valor controlado de acuerdo con lo especificado por (Crispin & Inga, 2015)., en la que se recomienda mantener un rango mínimo de 15°C y máximo de 35°C, para así asegurar un equilibrio entre la eficiencia del proceso y la estabilidad de las condiciones experimentales, lo que resultará en un tratamiento de agua con método fotocatalítico más controlado, predecible y eficiente.

Tabla 4.

Parámetros de medición para diseño experimental

Parámetros	Unidad de medida	Rangos	
		Mínimo	Máximo
pH	Unidad	6	8
Concentración de TiO_2	g/L	0.5	1.5
Tiempo de exposición a la radiación UV	Horas	4	4
Temperatura	°C	15	35

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la variable dependiente es el porcentaje de remoción:

Para cumplir con los objetivos de estudio y alcanzar resultados eficientes se han seguido una serie de procedimientos experimentales dentro del laboratorio, para así analizar la influencia de las variables del fotocatalizador para cada muestra a tratar y poder comparar los parámetros microbiológicos con los resultados. También a lo largo del proceso se ha evaluado la capacidad de remoción de contaminantes.

El cálculo del porcentaje de remoción se ha determinado por la siguiente ecuación:

$$\%remoción = \frac{C_{incial} - C_{final}}{C_{incial}} * 100 \qquad (Ecuación\ 1)$$

Dónde: *C* representa la concentración del parámetro

5.8. Caracterización inicial del agua residual de la empresa

La caracterización inicial del agua residual es una etapa fundamental en cualquier estudio o proceso de tratamiento, ya que proporciona información crítica sobre la

composición y calidad del agua. Es por eso que se han seguido las indicaciones establecidas en metodologías estandarizadas, como las del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, para garantizar que los procedimientos de muestreo, análisis e interpretación fueran consistentes y reproducibles.

Además de la carga microbiológica analizada en este estudio, es importante considerar que los efluentes de empresas agroindustriales como Vegyfrut, dedicadas al lavado de lechuga principalmente y vegetales, podrían contener residuos de insumos agrícolas utilizados durante el cultivo, tales como: fertilizantes (nitratos, fosfatos), fungicidas (triazoles, ditiocarbamatos) y herbicidas (glifosato), los cuales pueden llegar al agua residual mediante el lavado de vegetales (FAO, 2020).
Aunque este trabajo se enfoca en la caracterización microbiológica, se declara una consideración para próximas investigaciones que podrían evaluar el impacto de estos compuestos en la calidad del agua y su posible interacción con el microbiota presente, así como su remoción mediante tratamientos en línea con normativas como el Codex Alimentarius o los Límites Máximos de Residuos (LMR) establecidos por la EPA (MAGFOR, 2023).

Dentro del procesamiento para el producto de la empresa, se sabe que la lechuga y otros vegetales, son tratados a partir de un primer lavado, donde se utiliza agua potable municipal y se le añade 1 mL de cloro alimentario (hipoclorito de sodio) al 5% por cada 20 litros de agua. Posteriormente se realiza un segundo lavado con agua potable fría para disminuir residuos de cloro en el efluente.

Esto ha permitido obtener datos confiables que reflejan fielmente las características del agua residual, lo cual es crucial para tomar decisiones informadas en el diseño y evaluación de sistemas de tratamiento.

Sin una caracterización precisa, no sería posible determinar cuánto se han reducido los contaminantes o si el agua tratada cumple con los estándares de calidad

requeridos.

5.8.1. Recolección de la muestra

Los estudios experimentales se han realizado con muestras correspondientes al agua residual tomada de la corriente inicial luego del proceso de lavado de frutas en la planta.

- La muestra de agua residual se recolectó en un frasco estéril de polietileno de 100 mL, previamente lavado y esterilizado en autoclave.
- El punto de muestreo se seleccionó de acuerdo con el flujo del sistema de tratamiento, asegurando que la muestra fuera representativa del agua residual a analizar. Se tomó en un horario de la mañana, específicamente a las 7:14 a.m., debido a que en horas de mañana la carga micro orgánica es mayor y se realiza el primer proceso de lavado de vegetales dentro de la empresa.
- Inmediatamente después de la recolección, las muestras se mantuvieron en hielo (5°C) y se transportaron al laboratorio en un plazo de una hora para su procesamiento. Se ha recolectado la muestra siguiendo un protocolo de monitoreo y captación, considerando la cantidad de muestras y rotulación de cada una, establecido en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

5.9. Determinación de las condiciones favorables para la remoción de carga microbiológica mediante el proceso fotocatalítico

Para evaluar la influencia del pH y la concentración de TiO_2 en la remoción microbiológica, se preparó el catalizador y se describe el proceso realizado en el laboratorio de microbiología para la determinación de carga microbiológica y las condiciones favorables para el estudio.

Para las pruebas del proceso de fotocatálisis heterogénea, se utilizaron tubos de vidrio de borosilicato de 20 mL de capacidad. Este tipo de material garantiza

buena transmitancia e importante captura de rayos UV (a 254 nm).
Para cada prueba experimental, se dividieron 90 mL de volumen de la muestra en tres alícuotas de 30 mL cada una.
Para cada alícuota se ajustó el pH usando NaOH (hidróxido de sodio) y HCl (ácido clorhídrico) diluidos, según los siguientes rangos:

- pH 6: ligeramente ácido
- pH 7: neutro
- pH 8: ligeramente alcalino.

El pH se midió con un pH-metro previamente calibrado, y se ajustó gota a gota hasta alcanzar el valor deseado.

Se preparó el catalizador de TiO_2 a 0.5, 1 y 1.5 g/L y se diluyó en la muestra de 90 mL de manera que para cada una de las 3 alícuotas con pH ajustado (7, 8 y 9), se añadieron 20 mL de la solución de TiO_2 en las tres concentraciones preparadas (0.5, 1 y 1.5 g/L).

Esto generó un total de 9 muestras experimentales, combinando los tres niveles de pH con las tres concentraciones de TiO_2. para luego ser sometido a la radiación de luz ultravioleta durante un rango de tiempo de 4 horas.

Figura 5.

Lámpara UV de Media Presión, 365 nm

Fuente: *Laboratorio de Microbiología, UNI – PIENSA*

5.9.1. Determinación de contaminantes microbiológicos de la muestra

Para la determinación de Coliformes totales, Coliformes fecales y *E. coli*, se llevó a cabo una evaluación utilizando el método del número más probable. Este proceso se realizó a partir de una serie de diluciones decimales seriadas, empleando técnicas en tubos de ensayo.

Para la preparación del agua dilución, se disolvieron 34 g de fosfato dihidrógeno de potasio (KH_2PO_4) en 500 ml de agua destilada, se ajustó el pH a 7.2 con hidróxido de sodio (NaOH) a 1N y se diluyó hasta 1 L en agua destilada.

Se añadió 1.25 mL de solución madre de tampón de fosfato y 15 ml de solución de cloruro de magnesio hexahidratado (81.1 g de $MgCl_2$ * 6 H_2O/l de agua destilada) a 1 litro de agua destilada.

Se distribuyó en proporciones de 9 mL después de pasar por la autoclave.

Luego, se esperó a que la muestra tomara la temperatura ambiente del laboratorio, 15.3 °C antes de hacer las diluciones.

Por otro lado. utilizando una balanza, se pesaron 36.7 g de caldo Lauril sulfato de sodio deshidratado y se colocó en un matraz Erlenmeyer de 2000 mL y se añadió 1000 mL de agua destilada, se posicionó en una plancha de calentamiento a 55 °C a una velocidad de 120 rpm con un agitador magnético hasta que todos los componentes se disolvieron completamente.

Luego, se distribuyó en que contenían campanas de Durham (para detectar la producción de gas durante la fermentación). Se llenó cada tubo con 10 mL de caldo. Y se esterilizaron en una autoclave,
Posteriormente, se dejaron que los tubos se enfriaran a temperatura ambiente antes de su uso.

A través el método del número más probable para microorganismos, se evidenció si es positivo para los mismo y se determinó según los valores de la tabla 20 presente en los anexos, “Número más probable” (NMP).

La primera etapa es conocida como prueba presuntiva, para ello, se verificó que el recipiente que contenía la muestra estuviera limpio y en buenas condiciones antes de su apertura. Posteriormente, el recipiente se abrió de forma aséptica, flameando la boca con un mechero Bunsen para evitar la contaminación externa.

La muestra se agitó manualmente durante aproximadamente un minuto para garantizar una distribución homogénea de los microorganismos presentes. Luego, se dejó reposar durante un minuto para permitir la sedimentación de partículas grandes. Se procuró que la temperatura del diluyente y la ambiental fueran similares para evitar cambios bruscos que pudieran afectar a los microorganismos.

Utilizando una pipeta estéril, se transfirió 1 mL de la muestra inicial a un tubo que contenía 9 mL de agua de dilución estéril, obteniendo una dilución de 10^{-1}. A partir de esta dilución, se repitió el proceso de manera sucesiva hasta alcanzar una

dilución de $10^{-6.}$ Cada dilución se preparó tomando 1 mL de la dilución anterior y mezclándolo con 9 mL de agua de dilución estéril.

De las últimas tres diluciones (10^{-4}, 10^{-5} y 10^{-6}), se tomó 1 mL de cada una y se inoculó en tres filas de cinco tubos que contenían caldo Lauril Sulfato Triptosa. Antes de la inoculación, se flameó la boca de los tubos para mantener las condiciones de esterilidad. El inóculo se mezcló suavemente con el medio de cultivo para asegurar una distribución homogénea.

Los tubos inoculados se incubaron a una temperatura de 35 ± 0.5 °C durante un período de 48 ± 2 horas. Transcurrido este tiempo, se observó la formación de gas en las campanas de Durham dentro de los tubos, lo cual indicó la presencia de coliformes.

Para la prueba confirmativa para coliformes totales. se preparó el Caldo Lactosa Bilis Verde Brillante disolviendo el medio deshidratado en 1 L de agua destilada.

El medio preparado se distribuyó en volúmenes de 10 mL en tubos de ensayo. Cada tubo contenía una campana Durham invertida, asegurando que cubriera al menos parcialmente el vial después de la esterilización. Los tubos se cerraron con tapones resistentes al calor.

Los tubos se esterilizaron en autoclave. Se verificó que las campanas de Durham no contuvieran burbujas de aire después de la esterilización. Una vez preparado, el medio se almacenó en condiciones adecuadas hasta su uso.

Luego, se llevaron a la fase de confirmación todos los tubos primarios que mostraron formación de gas, turbidez, efervescencia o crecimiento ácido después de 48 horas de incubación, se hicieron rotar para producir una suspensión homogénea de los microorganismos y utilizando un asa estéril, se transfirió una asada completa del cultivo primario a un tubo que contenía el medio verde brillante tres veces. Este proceso se repitió para todos los tubos que mostraron resultados positivos.

Los tubos con medio verde brillante se incubaron a 35 ± 0.5 °C durante 48 ± 2 horas. La formación de cualquier cantidad de gas en la campana Durham del medio verde brillante dentro del período de incubación se consideró un resultado positivo en la fase confirmatoria. Finalmente, se calculó el Número Más Probable (NMP) a partir del número de tubos positivos.

Por otro lado, para la prueba confirmativa para coliformes fecales, se preparó el EC disolviendo el medio deshidratado en 1 L de agua destilada.
El medio preparado se distribuyó en volúmenes de 10 mL en tubos de ensayo. Cada tubo contenía una campana Durham invertida, asegurando que cubriera al menos parcialmente el vial después de la esterilización. Los tubos se cerraron con tapones resistentes al calor.

Los tubos se esterilizaron en autoclave. Se verificó que las campanas de Durham no contuvieran burbujas de aire después de la esterilización. Una vez preparado, el medio se almacenó en condiciones adecuadas hasta su uso.

Luego, se llevaron a la fase de confirmación todos los tubos primarios que mostraron formación de gas, turbidez, efervescencia o crecimiento ácido después de 48 horas de incubación, se hicieron rotar para producir una suspensión homogénea de los microorganismos y utilizando un asa estéril, se transfirió una asada completa del cultivo primario a un tubo que contenía el medio verde brillante tres veces. Este proceso se repitió para todos los tubos que mostraron resultados positivos.

Los tubos con medio EC se llevaron a baño María a 44.5 °C durante 48 horas.
La formación de cualquier cantidad de gas en la campana Durham del EC dentro del período de incubación se consideró un resultado positivo en la fase confirmatoria. Finalmente, se calculó el Número Más Probable (NMP) a partir del número de tubos positivos.

Finalmente, para la prueba confirmativa para *E. coli*, se preparó el EC+MUG

disolviendo el medio deshidratado en 1 L de agua destilada.
El medio preparado se distribuyó en volúmenes de 10 mL en tubos de ensayo. Cada tubo contenía una campana Durham invertida, asegurando que cubriera al menos parcialmente el vial después de la esterilización. Los tubos se cerraron con tapones resistentes al calor.

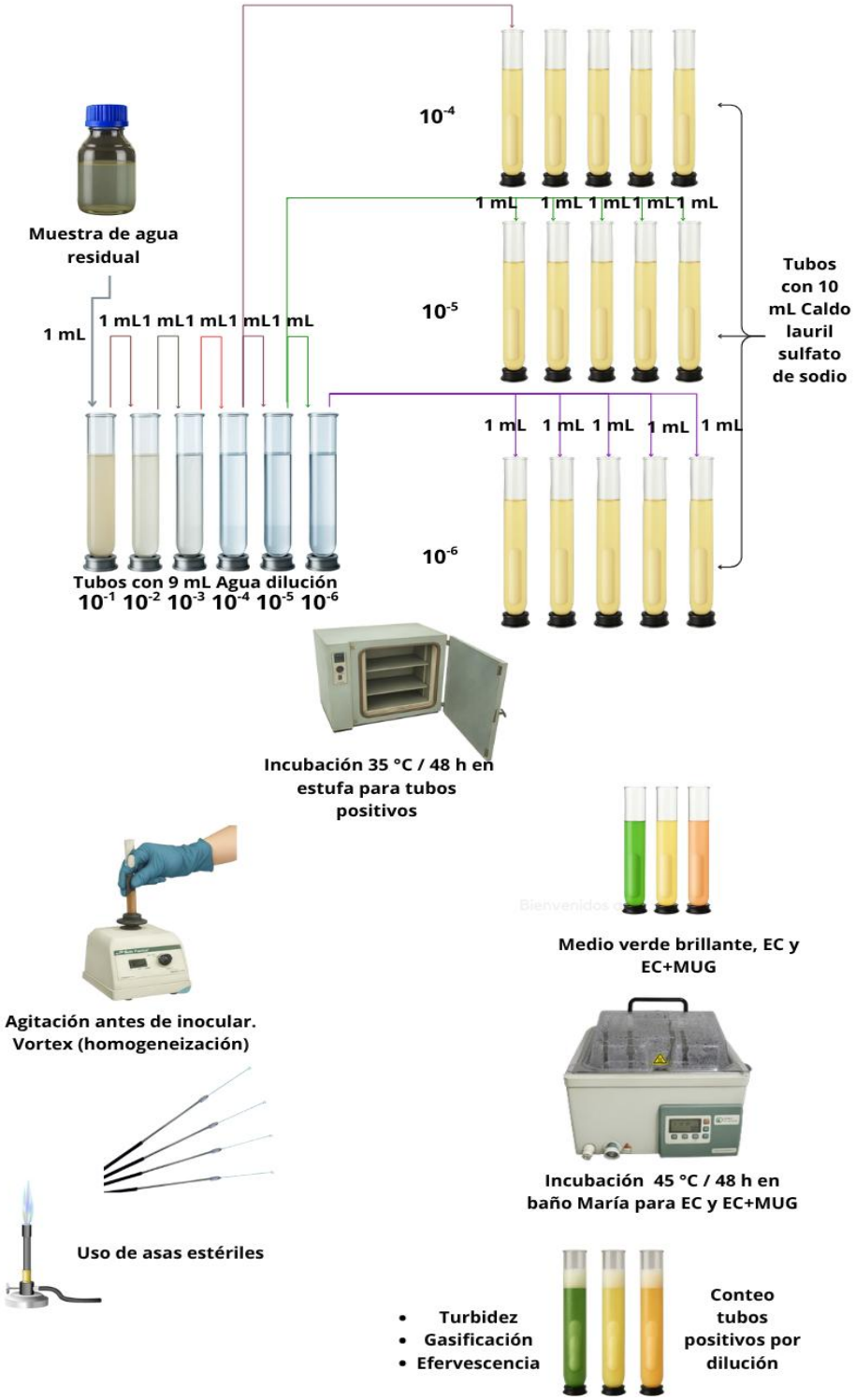
Los tubos se esterilizaron en autoclave. Se verificó que las campanas de Durham no contuvieran burbujas de aire después de la esterilización. Una vez preparado, el medio se almacenó en condiciones adecuadas hasta su uso.

Luego, se llevaron a la fase de confirmación todos los tubos primarios que mostraron formación de gas, turbidez, efervescencia o crecimiento ácido después de 48 horas de incubación, se hicieron rotar para producir una suspensión homogénea de los microorganismos y utilizando un asa estéril, se transfirió una asada completa del cultivo primario a un tubo que contenía el medio verde brillante tres veces. Este proceso se repitió para todos los tubos que mostraron resultados positivos.

Los tubos con medio EC+MUG se llevaron a baño María a 44.5 °C durante 48 horas. La formación de cualquier cantidad de gas en la campana Durham del EC+MUG dentro del período de incubación se consideró un resultado positivo en la fase confirmatoria. Finalmente, se calculó el Número Más Probable (NMP) a partir del número de tubos positivos.

Figura 6.

Método del NMP para aguas residuales afluente



Fuente: Elaboración propia

5.10. Validación de la efectividad de remoción de carga microbiológica en las aguas residuales en comparación con parámetros de calidad del agua.

A partir de los experimentos realizados, todos los datos experimentales obtenidos se analizan usando el estadístico ANOVA, $p < 0,05$. Este análisis permite determinar para los resultados un nivel de confianza del 95 %. Así también, se utiliza el índice de correlación de Pearson para la validar la hipótesis nula o alternativa en dependencia del análisis con los resultados obtenidos, en hojas de cálculo SPSS para el procesamiento de datos.

Los resultados se comparan con los parámetros de calidad para aguas residuales, validando así la efectivad de remoción según las normativas. Entre estas, NTON 05 027-05, Decreto ejecutivo N°.21-2017, y la Normativa Internacional OMS para aguas residuales, la cual se considera en conjunto de las primeras dos mencionadas.

VI. Resultados y Discusión

6.1. Resultados de la caracterización de las aguas residuales

A continuación, en la presente tabla se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de las aguas residuales, para microorganismos en el efluente, a través de los análisis y procedimiento del laboratorio, en conjunto con los parámetros de calidad del agua.

Tabla 5.

Caracterización inicial del agua residual de la planta de procesamiento de frutas.

Parámetro	Valor obtenido	NTON 05 027-05	Decreto ejecutivo N°.21-2017
Coliformes Totales Iniciales (NMP/1000 mL)	>1600	-	-
Coliformes Totales Iniciales (NMP/1000 mL)	**>1600**	**$1x10^3$**	**$1x10^4$**
E. coli (NMP/1000 mL)	>1600	-	-

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que todos los valores iniciales de indicadores microbianos (>1600 NMP/1000 mL) superan ampliamente los límites establecidos en ambas normativas:

- NTON 05 027-05: Límite de $1x10^3$ NMP/1000 mL para coliformes fecales (excedencia >1.6×).

- Decreto 21-2017: Límite de $1×10^4$ NMP/1000 mL para coliformes fecales (excedencia >0.16×, pero aún fuera de norma).

Los coliformes totales exceden en 600 unidades el límite de la NTON 05 027-05,

indicando contaminación microbiológica significativa y superan el límite del Decreto 21-2017 (aunque en menor proporción), sugiriendo contaminación de origen fecal. Además, la presencia de *E. coli* (no regulada en estas normativas) refuerza el riesgo microbiológico.

6.2. Resultado de la influencia para condiciones favorables del proceso de fotocatálisis heterogénea

El análisis de los parámetros que influyen el proceso de fotocatálisis heterogénea se ha desarrollado para el pH en tres niveles 6,7,8 y 9; y tres niveles para la concentración del catalizador TiO_2 con valores de 0.5, 1.0 y 1.5 g/L, con una exposición a la radiación UV de 4 horas. Como valor inicial de Coliformes Totales se ha usado como indicador de este grupo a la bacteria *E. coli* mediante la metodología utilizada, teniendo una concentración promedio inicial de >1600 NMP/100 ml presentes en el agua residual tratada.

Haciendo uso del diseño estadístico Taguchi se analizó el porcentaje de remoción de Coliformes Totales y fecales usando *E. coli* como indicador, como resultado se observó la variación de la concentración de Coliformes en el reactor propuesto en conjunto con las demás variables de análisis, dicho estudio se realizó en un tiempo establecido de 4 horas, donde se obtuvo la concentración de Coliformes Totales Iniciales y los porcentajes de remoción de Coliformes, además de la influencia de las variables en la disminución de la concentración de Coliformes. Las variaciones de las condiciones de operación del sistema son: pH y la concentración del fotocatalizador.

En la tabla 6 se muestra el arreglo ortogonal y los valores seleccionados para cada nivel de las variables experimentales de cada corrida según lo establecido por el método Taguchi.

Tabla 6.

Condiciones experimentales del método Taguchi

Corrida	pH	Concentración del fotocatalizador (g/L)	*Coliformes Totales Iniciales* (NMP/1000 mL)	Tiempo de exposición de la muestra (horas)	% de Remoción de Coliformes	Coliformes Totales, Fecales y *E. coli* Finales (NMP/ 1000 mL)
1	6	0.5	>1600	4	100.000	0
2	6	1.0	>1600	4	100.000	0
3	6	1.5	>1600	4	100.000	0
4	7	0.5	>1600	4	99.619	6.1
5	7	1.0	>1600	4	100.000	0
6	7	1.5	>1600	4	100.000	0
7	8	0.5	>1600	4	99.619	6.1
8	8	1.0	>1600	4	100.000	0
9	8	1.5	>1600	4	99.313	11

Fuente: Elaboración Propia

La tabla muestra el porcentaje de remoción de coliformes como consecuencia de la fotocatálisis heterogénea y los parámetros que condicionan su funcionamiento, el pH, la concentración del fotocatalizador TiO_2 y la exposición a la radiación UV, obteniendo resultados favorables para este proceso

Los resultados demostraron que el proceso fotocatalítico con TiO_2 logró una remoción del 100% de coliformes totales, fecales y *E. coli* en condiciones óptimas (pH 6 y 1.0 g/L de TiO_2). Este hallazgo es consistente con estudios previos que destacan la capacidad del TiO_2 para generar especies reactivas de oxígeno (como radicales hidroxilos) bajo irradiación UV, las cuales degradan la pared celular de microorganismos patógenos (Garcés et al., 2004). La eficacia observada supera los

tratamientos convencionales (ej. cloración), que suelen dejar residuos tóxicos o ser menos efectivos contra ciertos patógenos.

6.3. Efecto del pH en la concentración de coliformes totales

Se realizó un análisis de varianza de un factor (ANOVA) para evaluar el efecto del pH sobre los Coliformes Totales, Fecales y *E. coli* Finales en el efluente tratado con dióxido de titanio.

En la tabla 7, los resultados mostraron que el pH no tuvo un efecto significativo sobre la reducción de Coliformes Totales, Fecales y *E. coli* Finales ($F(2, 6) = 1.76$, $p = 0.25$).

Tabla 7.

ANOVA de un factor pH y coliformes

Fuente	Tipo III Suma de Cuadrados	df	Media cuadrática	F	Valor p.	Eta cuadrado parcial
Modelo corregido	50.069a	2	25.034	1.756	0.251	0.369
Intercepto	59.804	1	59.804	4.195	0.086	0.411
pH	50.069	2	25.034	1.756	0.251	0.369
Error	85.547	6	14.258			
Total	195.420	9				
Total corregido	135.616	8				

a. R al cuadrado = 0.369 (R cuadrado ajustado = 0.159)

Fuente: SPSS. (2025) – Elaboración Propia

- Medias estimadas:

pH 6: Media de Coliformes Totales Finales = 0 NMP/1000 mL.

pH 7: Media de Coliformes Totales Finales = 2.03 NMP/1000 mL.

pH 8: Media de Coliformes Totales Finales = 5.7 NMP/1000 mL.

El análisis ANOVA no mostró un efecto significativo del pH sobre los Coliformes Totales Finales en el tratamiento fotocatalítico con dióxido de titanio, presente en la tabla 3. Esto sugiere que, dentro del rango de pH evaluado (6 a 8), la eficacia del tratamiento no varía significativamente en términos de reducción de Coliformes Totales. Sin embargo, se observó una tendencia hacia una mayor reducción de Coliformes Totales a pH 6, lo que podría indicar que este valor de pH es ligeramente más favorable para la actividad catalítica.

Se rechaza la hipótesis alternativa ya que se mostró que el pH no tuvo un efecto altamente significativo ($p = 0.25$) en la remoción de coliformes. Así también, se observó una tendencia hacia mayor eficiencia en pH ácido (6), donde la remoción fue del 100%, comparado con pH 8 (99.3%). Esto podría deberse a que:

- A pH 6, la superficie del TiO_2 presenta mayor carga positiva, favoreciendo la adsorción de microorganismos (de carga negativa) y su posterior oxidación (Khan et al., 2010).
- A pH alcalino, la formación de radicales hidroxilos puede verse inhibida por la competencia con iones OH^- (Gutiérrez García, 2020).
  Este resultado coincide con trabajos como los de Singh et al. (2013), quienes reportaron mayor actividad fotocatalítica en pH ácido para aguas residuales industriales.

6.4. Efecto del factor de concentración del catalizador y coliformes totales finales

La determinación del efecto de la Concentración del Catalizador TiO_2, en la concentración de Coliformes Totales, al igual que los análisis mostrados anteriormente, se realizaron mediante el estadístico de varianza ANOVA, presentando los siguientes resultados a partir de los datos obtenidos a nivel de laboratorio.

Se realizó un análisis de varianza de un factor (ANOVA), mostrado en la tabla 8 para evaluar el efecto de la concentración de dióxido de titanio (TiO_2) sobre los Coliformes Totales Finales en el efluente tratado. Los resultados mostraron que la concentración de TiO_2 no tuvo un efecto significativo sobre la reducción de Coliformes Totales Finales ($F(2, 6) = 0.86$, $p = 0.46$).

Tabla 8.

ANOVA de un factor concentración del fotocatalizador y coliformes

	Suma de cuadrados	df	Media cuadrática	F	Valor p
Entre grupos	30.142	2	15.071	0.857	0.470
Entre grupos	105.473	6	17.579		
Total	135.616	8			

Fuente: SPSS. (2025) Elaboración propia.

- Medias estimadas:

0.5 g/L: Media de Coliformes Totales Finales = 4.07 NMP/1000 mL.

1.0 g/L: Media de Coliformes Totales Finales = 0 NMP/1000 mL.

1.5 g/L: Media de Coliformes Totales Finales = 3.67 NMP/1000 mL.

Como se puede observar a 1 g/L, la reducción es total (media = 0). y a 0.5 g/L y 1.5

g/L, hay variabilidad.

No se viola el supuesto de homogeneidad de varianzas (p=0.073 >0.05). Sin embargo, la concentración 1 g/L tiene varianza cero, lo que refiere a una mayor efectividad en la varianza realizada en este factor.

El análisis ANOVA no mostró un efecto significativo de la concentración de dióxido de titanio sobre los Coliformes Totales, Fecales y *E. coli* Finales en el tratamiento fotocatalítico. Esto sugiere que, dentro del rango de concentraciones evaluado (0.5 a 1.5 g/L), la eficacia del tratamiento no varía significativamente en términos de reducción de Coliformes. Sin embargo, se observó una tendencia hacia una mayor reducción de Coliformes a una concentración de 1.0 g/L, lo que podría indicar que este valor de concentración es ligeramente más favorable para la actividad catalítica.

Se comprueba la hipótesis alternativa ya que la concentración de 1.0 g/L de TiO_2 mostró la mayor eficiencia (100% de remoción), mientras que concentraciones mayores (1.5 g/L) o menores (0.5 g/L) redujeron levemente la efectividad pero si generaron varianza. Esto se explica por:

- 0.5 g/L: Insuficiente cantidad de sitios activos para generar radicales libres.
- 1.5 g/L: Posible aglomeración de partículas de TiO_2, que reduce su área superficial y dispersión de la luz UV (Escuadra et al., 2013). La relación señal/ruido (S/N = 40 dB para 1.0 g/L) respalda esta condición como la más estable. Estudios similares en aguas residuales textiles (Alegre & Rosales, 2017) también identificaron concentraciones moderadas de TiO_2 como óptimas.

6.5. Análisis del proceso de fotocatálisis heterogénea y su influencia en la concentración de coliformes finales

Se realizó la prueba de hipótesis para determinar la influencia de la concentración del TiO_2 en la concentración final de coliformes. Hipótesis sobre el proceso de

fotocatálisis heterogénea:

El análisis de varianza para determinar la influencia del proceso de fotocatálisis en la concentración de Coliformes finales se realizó mediante el programa SPSS, la información resumen se encuentra en la tabla 9.

Tabla 9.

Factor porcentaje de remoción vs. pH y concentración

		N
pH	6.000	3
	7.000	3
	8.000	3
Concentración del fotocatalizador	.500	3
	1.000	3
	1.500	3

Fuente: SPSS. (2025) Elaboración Propia

En la tabla 10 se presenta el análisis de varianza (ANOVA) para determinar la influencia del proceso de fotocatálisis en la concentración de coliformes

Tabla 10.

ANOVA factor porcentaje de remoción vs. pH y concentración

Fuente	SC Ajustada	df	MC Ajustada	F	Valor p.
Modelo Lineal	0.195	2	0.098	1.760	0.250
pH	0.195	2	0.098	1.760	0.250
Concentración catalizador	0.195	2	0.098	1.760	0.250
Error	0.334	6	0.056		

Total	0.529	8	

Fuente: SPSS. (2025) Elaboración Propia

El valor p es aproximadamente 0.25 (no significativo, ya que p > 0.05).

El análisis ANOVA no encontró diferencias significativas en el porcentaje de remoción de Coliformes entre los diferentes niveles de pH y concentración de TiO_2. Esto sugiere que, dentro del rango estudiado, estos factores no son determinantes en la eficacia del tratamiento fotocatalítico.

6.6. Análisis de correlación de Pearson

El presente análisis muestra los resultados obtenidos a través de la correlación de Pearson, para conocer el porcentaje de variabilidad para el pH y la concentración de catalizador.

6.6.1. Para pH vs porcentaje de remoción

En la tabla 11, el coeficiente de correlación (r=−0.6) indica una correlación negativa moderada entre el pH y el porcentaje de remoción de Coliformes, lo que sugiere que, a medida que el pH aumenta, el porcentaje de remoción tiende a disminuir.

Tabla 11.

Correlaciones pH vs porcentaje de remoción.

		pH	Porcentaje de remoción
pH	Correlación de Pearson	1	-0.567
	Sig. (2-colas)		0.112
	N	9	9
Porcentaje de remoción	Correlación de Pearson	-0.567	1

	Sig. (2-colas)	0.112	
	N	9	9

Fuente: SPSS. (2025) Elaboración Propia

En la tabla 12, el coeficiente de determinación (R^2=0.367) indica que el 36.7% de la variabilidad en el porcentaje de remoción puede explicarse por el pH.

Tabla 12.

Regresión lineal pH vs porcentaje de remoción

Modelo	R	R Cuadrado	R Cuadrado Ajustado	Error estándar de la estimación
1	0.567a	0.321	0.224	0.215015

a. Predictores: (Constante), pH

Fuente: SPSS. (2025) Elaboración Propia

En la tabla 13, el valor p = 0.100 para el coeficiente de pH sugiere que la relación no es estadísticamente significativa al nivel de significancia del 5%.

Tabla 13.

Coeficientes pH vs porcentaje de remoción

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Valor p
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constante)	100.933	0.619		163.158	<0.001
	pH	-0.160	0.088	-0.567	-1.819	0.112

a. Variable Dependiente: Porcentaje de remoción

Fuente: SPSS. (2025) Elaboración Propia

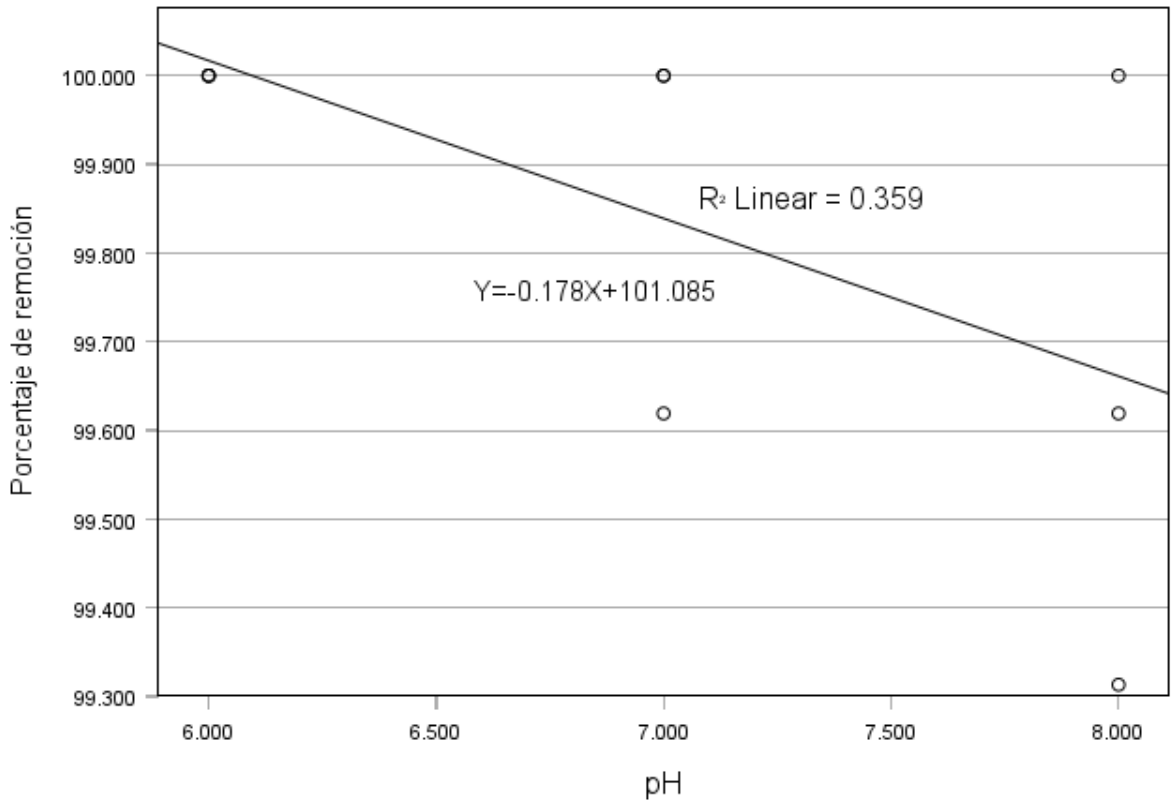
El análisis de correlación y regresión lineal muestra una correlación negativa

moderada entre el pH y el porcentaje de remoción de Coliformes. Sin embargo, la relación no es estadísticamente significativa al nivel de significancia del 5%. Esto sugiere que, aunque hay una tendencia, el pH no es un predictor fuerte del porcentaje de remoción en este conjunto de datos.

En la figura 7, la pendiente negativa indica que hay una relación inversa entre el pH y el porcentaje de remoción. Es decir, a medida que el pH aumenta, el Porcentaje de Remoción tiende a disminuir. Por otro lado, el valor de R^2=0.359 indica que el 35.9% de la variabilidad en el porcentaje de remoción puede explicarse por el pH.

Figura 7.

Diagrama de dispersión de porcentaje de remoción vs pH



Fuente: SPSS. (2025) Elaboración Propia

Esto sugiere que, aunque hay una tendencia, el pH no es un predictor fuerte del porcentaje de remoción en este conjunto de datos.

6.6.2. Para concentración del catalizador vs porcentaje de remoción

En la tabla 14, el coeficiente de correlación (r=0.0421) indica una correlación positiva muy débil entre la concentración del catalizador y el porcentaje de remoción de Coliformes Totales.

Tabla 14.

Correlaciones pH vs porcentaje de remoción

		Concentración del catalizador	Porcentaje
Concentración del catalizador	Correlación de Pearson	1	0.042
	Sig. (2-colas)		0.914
	N	9	9
Porcentaje	Correlación de Pearson	0.042	1
	Sig. (2-colas)	0.914	
	N	9	9

Fuente: SPSS. (2025) Elaboración Propia

El coeficiente de correlación (r=0.0421) indica una correlación positiva muy débil entre la concentración del catalizador y el porcentaje de remoción de Coliformes Totales, Fecales y *E. coli.*

Esto sugiere que la concentración del catalizador tiene un efecto mínimo en el porcentaje de remoción.

En la tabla 15, el coeficiente de determinación (R^2=0.0018) indica que solo el 0.18% de la variabilidad en el porcentaje de remoción puede explicarse por la concentración del catalizador.

Tabla 15.

Regresión lineal concentración del fotocatalizador vs porcentaje de remoción.

Modelo	R	R Cuadrado	R Cuadrado Ajustado	Error Estándar de la Estimación
1	0.042a	0.002	-0.141	0.274659

a. Predictores: (Constante), Concentración del catalizador

Fuente: SPSS. (2025) Elaboración Propia

En la tabla 16, el valor p<0.001 para el coeficiente de concentración sugiere que la relación no es estadísticamente significativa al nivel de significancia del 5%.

Tabla 16.

Coeficientes a concentración del fotocatalizador vs porcentaje de remoción

Modelo		Coeficientes no estandarizados	Coeficientes estandarizados	t	Valor p
		B	Beta		
1	(Constante)	99.814		412.068	<0.001
	Concentración del catalizador	0.025	0.042	0.111	0.914

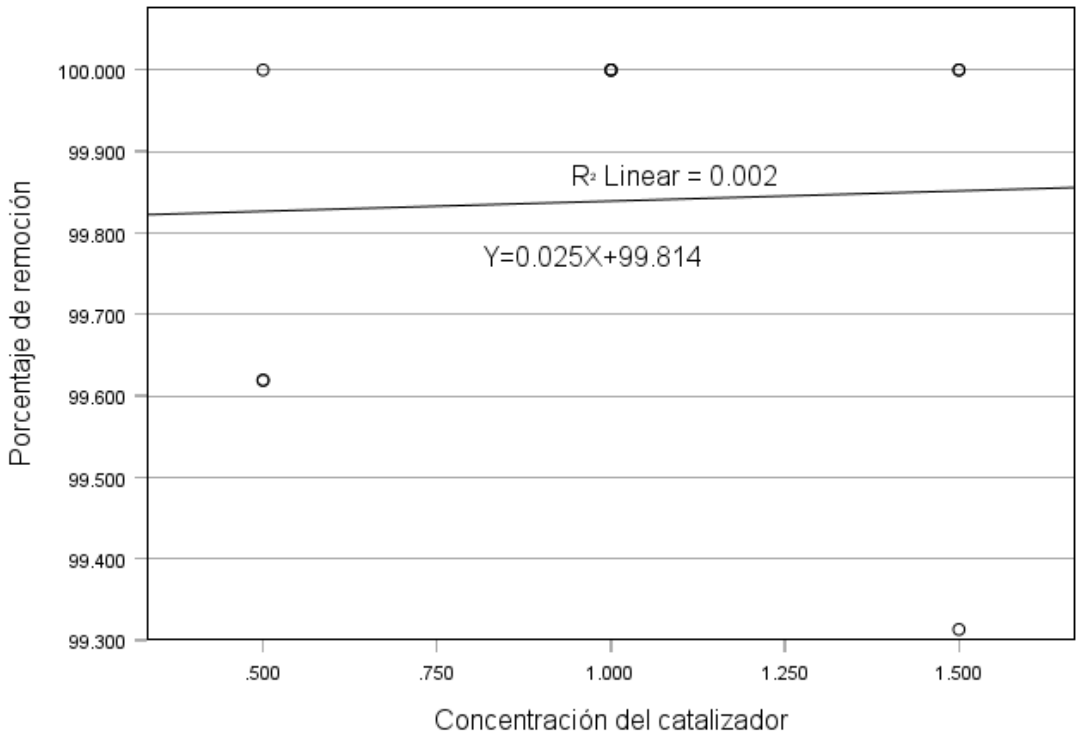
a. Variable Dependiente: Porcentaje

Fuente: SPSS. (2025) Elaboración Propia

El análisis de correlación y regresión lineal muestra una correlación positiva muy débil entre la concentración del catalizador y el porcentaje de remoción de Coliformes Totales, Fecales y *E. coli.* Sin embargo, la relación no es estadísticamente significa, lo que sugiere que la concentración del catalizador no es un predictor fuerte del porcentaje de remoción en este conjunto de datos.

Figura 8.

Diagrama de dispersión del catalizador vs porcentaje de remoción.



Fuente: SPSS. (2025) Elaboración Propia

En la Figura 8, la pendiente es positiva (a=0.025), lo que indica que existe una tendencia positiva entre la concentración del catalizador y el porcentaje de remoción.

Sin embargo, la pendiente es muy pequeña, lo que sugiere que el efecto de la concentración del catalizador sobre el porcentaje de remoción es mínimo. Por otro lado, esta relación no es estadísticamente significativa, y la concentración del catalizador explica solo una pequeña fracción de la variabilidad en el porcentaje de remoción.

En general, el porcentaje de remoción se mantiene cercano al 100%, independientemente de la concentración del catalizador.

6.7. Relaciones de señal ruido para cada nivel de las variables

Con ayuda del programa SPSS se realizó el cálculo de las relaciones de señal/ruido para cada nivel de las variables mediante la ecuación:

$$S/N = -10\ log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y^2}\right] \qquad (Ecuación\ 2)$$

Donde Y es el valor de la variable respuesta y n representa el número de cada dato. Para el estadístico señal/ruido se escogió el criterio de "más grande es mejor", lo que indica que los valores mayores de señal de ruido son los deseados.

El criterio seleccionado nos indica que los valores más altos de señal ruido S/N obtenidos fueron los que proporcionaron valores mayores (Tabla 17) para la capacidad máxima de remoción.

Tabla 17.

Relaciones de señal/ruido vs pH

pH	Valor
6.000	40.0000
7.000	39.9889
8.000	39.9690

Fuente: SPSS. (2025) Elaboración Propia

En la tabla 18 podemos observar los resultados obtenidos con el programa estadístico SPSS, donde se realizó un estudio de las relaciones señal ruido de cada nivel para cada variable analizada.

Tabla 18.

Relaciones de señal/ruido vs concentración del fotocatalizador

Concentración del fotocatalizador	Valor
.500	39.9779
1.000	40.0000
1.500	39.9800

Fuente: SPSS. (2025) Elaboración Propia

Clasificación de los niveles:

a. Para el pH:
    - Mejor nivel: pH 6 (40.00 dB).
    - Segundo mejor nivel: pH 7 (39.99 dB).
    - Tercer mejor nivel: pH 8 (39.98 dB).

b. Para la concentración:
    - Mejor nivel: 1 g/L (40.00 dB).
    - Segundo mejor nivel: 0.5 g/L y 1.5 g/L (ambos con 39.99 dB).

Por tanto, la combinación óptima para maximizar la remoción de Coliformes es: pH 6 y concentración de 1 g/L.

Los resultados cumplieron con los límites más estrictos de:

- NTON 05-027-05 (Categoría A para reúso en agricultura). Además, se superaron los estándares de la OMS (<1,000 NMP/100 mL), lo que sugiere que el método es viable para aplicaciones en países con regulaciones exigentes. La eliminación total de *E. coli* es particularmente relevante para evitar riesgos en cultivos de consumo crudo (OMS, 2006).

Tiempo de tratamiento: Las 4 horas de irradiación UV podrían ser un desafío para

escalar el proceso. Se podría evaluar fuentes de luz solar directa para reducir costos (Jaramillo & Pinzon, 2017).

Sin embargo, su implementación requiere inversión inicial en lámparas UV y catalizador, lo que debe evaluarse en estudios de costos a nivel de mayor escala para el tratamiento de grandes cantidades de aguas residuales para industrias de procesamiento de frutas que infieren según la carga microbiológica en dichos efluentes, descritos asi en un estudio relacionado, titulado “Efectividad de remoción de Coliformes Totales con fotocatalización”, donde investigaron la desinfección fotocatalítica de bacterias coliformes totales (CT) y la reducción de la demanda química de oxígeno ($DQO.$). En los experimentos se estableció el tiempo de irradiación (240 minutos), tiempo de contacto, $pH\ (7{,}2)$, concentración de TiO_2 y concentración de H_2O_2 (10 mL al 50%).

De los resultados, la reducción fotocatalítica es una técnica muy efectiva para la desinfección de coliformes. A las condiciones establecidas, el $95{,}2\%$ de los CT se eliminó de las aguas residuales, a un máximo de 97% eliminación de DQO a un pH normal. (Cabañas, 2019)

6.8. Validación de la efectividad en comparación de los resultados con los parámetros de calidad del agua establecidos por la normativa ambiental vigente

En Nicaragua y a nivel general, la calidad del agua residual tratada está regulada por la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense (NTON 05-027-05), que establece los límites máximos permisibles para diversos parámetros, incluyendo coliformes fecales y totales. Además, el Decreto Ejecutivo N° 21-2017 regula específicamente los límites de coliformes fecales en las descargas de aguas residuales, con el objetivo de proteger la salud pública y el medio ambiente (Portal del SICA, 2013).

6.8.1. Coliformes Fecales

Según la tabla "Límites Permisibles de Coliformes Fecales, Arto. 24", los límites máximos permisibles para coliformes fecales se rigen por el Principio de Gradualidad, con el objetivo de lograr la aplicación de la mejor tecnología disponible para reducir la contaminación. Los límites establecidos son los siguientes:

- Período 2017-2022: $1x10^5$ NMP/100 mL.
- Período 2023-2026: $1x10^4$ NMP/100 mL.
- Período 2027-2029: $1x10^3$ NMP/100 mL.

Estos límites son aplicables a las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores, con el fin de garantizar que no se afecte la salud humana ni el medio ambiente (Decreto Ejecutivo N° 21-2017).

Por otro lado, la NTON 05-027-05 establece límites más específicos para el reúso de aguas residuales tratadas, dependiendo de la categoría de riesgo:

- Categoría A (riego de cultivos que se consumen crudos): $1x10^3$ NMP/100 mL.
- Categoría B (riego de cultivos sin contacto directo con el agua tratada): $1x10^4$ NMP/100 mL.
- Categoría C (riego de cultivos perennes y bosques): $1x10^5$ NMP/100 mL.

En el presente estudio, los resultados mostraron que el proceso fotocatalítico con TiO_2 logró una remoción del 100% de coliformes fecales en condiciones óptimas (pH 6 y concentración de TiO_2 de 1.0 g/L). Esto significa que el agua tratada cumplió con los límites más estrictos establecidos por la NTON 05-027-05 para la categoría A ($1x10^3$ NMP/100 mL). Adicionalmente esto también sugiere que el agua tratada podría ser reutilizada para riego de cultivos que se consumen crudos sin representar un riesgo predecible.

6.8.2. Coliformes totales y E. coli

En este estudio, los resultados mostraron una remoción del 100% de coliformes totales y *E. coli* en condiciones óptimas. Esto no solo cumple con los estándares nicaragüenses, sino que también supera las expectativas en términos de calidad microbiológica, ya que el agua tratada estaría libre de estos microorganismos patógenos.

6.8.3. Normativa Internacional, OMS

A nivel internacional, organizaciones como la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece estándares de calidad del agua más estrictos que los de Nicaragua, especialmente en lo que respecta a la presencia de microorganismos patógenos.

Coliformes Fecales

- OMS: Recomienda un límite de <1,000 NMP/100 mL para aguas residuales tratadas que se reutilizan en agricultura, especialmente en cultivos que se consumen crudos (OMS, 2006).

En este estudio, los resultados mostraron una remoción del 100% de coliformes fecales, lo que significa que el agua tratada cumpliría no solo con los estándares nicaragüenses, sino también con los estándares internacionales de la OMS. Esto sugiere que el proceso fotocatalítico con TiO_2 es altamente efectivo en la inactivación de microorganismos patógenos, incluso en comparación con normativas más estrictas.

E. coli

- OMS: Recomienda la ausencia de *E. coli* en aguas residuales tratadas que se reutilizan en actividades que implican contacto humano directo, como el riego de cultivos que se consumen crudos (OMS, 2006).

En este estudio, la remoción del 100% de *E. coli* demuestra que el agua tratada cumpliría con los estándares más exigentes de la OMS y la EPA, lo que refuerza la

viabilidad del proceso fotocatalítico como una tecnología efectiva para el tratamiento de aguas residuales.

6.8.4. Comparación general

En términos generales, los resultados obtenidos en este estudio demuestran que el proceso fotocatalítico con TiO_2 es altamente efectivo en la remoción de microorganismos patógenos, cumpliendo no solo con los estándares nacionales de Nicaragua (NTON 05-027-05), sino también con los estándares internacionales más estrictos (OMS y EPA). Esto posiciona a la fotocatálisis heterogénea como una tecnología viable y sostenible para el tratamiento de aguas residuales en la industria alimentaria, especialmente en regiones donde la infraestructura para el tratamiento convencional es limitada.

Además, la capacidad del proceso para reducir la carga microbiológica de las aguas residuales sugiere que el agua tratada podría ser reutilizada en actividades como el riego agrícola, contribuyendo a la sostenibilidad del proceso y a la reducción del consumo de agua potable. Sin embargo, se recomienda realizar estudios adicionales para evaluar la estabilidad del proceso a largo plazo.

Esta comparación se centra en los parámetros microbiológicos, desarrollando más a fondo la información y haciendo referencia al Decreto Ejecutivo N° 21-2017 y los datos de la ***tabla 3*** presente en el estudio, denominada "*Límites Permisibles de Coliformes Fecales, Arto. 24*".

VII. Conclusiones

La caracterización inicial de las aguas residuales de Vegyfrut evidenció una alta carga microbiológica (<1600 NMP/100 mL), lo cual resaltó la urgencia de implementar tecnologías de tratamiento efectivas. Esta etapa permitió identificar los parámetros microbiológicos del sistema, sentando así las bases para una intervención técnica fundamentada, demostrando que el método fotocatalítico utilizando dióxido de titanio es altamente efectivo para la remoción de carga microbiológica, específicamente Coliformes Totales, Fecales y *E. coli*, presentes en las aguas residuales de la empresa Vegyfrut.

Mediante la aplicación de un diseño experimental tipo Taguchi y el análisis estadístico ANOVA, se determinó que las condiciones óptimas para maximizar la remoción microbiológica fueron un pH de 6 y una concentración de TiO_2 de 1.0 g/L. Estas condiciones promovieron una mayor generación de radicales hidroxilo y mejor interacción del catalizador con los microorganismos presentes.

Los resultados finales confirmaron la remoción total (100%) de Coliformes Totales, Fecales y *E. coli*, lo cual valida la eficacia del proceso fotocatalítico. Esta remoción permitió que el agua tratada cumpliera con los límites establecidos por la NTON 05-027-05 (categoría A) y el decreto ejecutivo 21-2017. Además, la calidad del agua tratada la hace apta para aplicaciones de reúso, como el riego agrícola de cultivos de consumo crudo, lo que representa un avance importante hacia la sostenibilidad hídrica en la industria alimentaria. Esta efectividad permitió que el efluente tratado cumpliera con los estándares más estrictos establecidos tanto por la normativa nacional, lo cual posiciona a este proceso como una alternativa viable y sostenible para la industria alimentaria nicaragüense.

VIII. Recomendaciones

Se sugiere a futuros investigadores realizar estudios de escalamiento para evaluar la viabilidad del proceso fotocatalítico a nivel industrial. Esto incluiría la construcción de un reactor fotocatalítico piloto que permita tratar mayores volúmenes de agua residual y evaluar la eficiencia del proceso en condiciones reales de operación.

Se recomienda a equipos de operación y mantenimiento en plantas de tratamiento de aguas residuales aplicar el proceso bajo un pH de 6.0 y una concentración de 1.0 g/L de TiO_2, ya que estas condiciones demostraron ser las más efectivas durante el estudio. Asimismo, mantener un tiempo de exposición de al menos 4 horas bajo lámpara UV con longitud de onda de 365 nm, y controlar la temperatura entre 25 °C y 35 °C, permite obtener resultados óptimos sin afectar la estabilidad del sistema o ajustando dichas variables de estudio para obtener resultados favorables según convenga para cada empresa generadora de aguas residuales.

Para asegurar la efectividad del proceso y el cumplimiento de la normativa nacional (NTON 05-027-05) e internacional (OMS, CAPRE), es esencial establecer un sistema de monitoreo microbiológico periódico. Se recomienda a consultores ambientales realizar controles semanales de coliformes totales, fecales y *E. coli* utilizando el método del Número Más Probable (NMP), especialmente en épocas de alta producción o variabilidad de carga orgánica.

Dado que el proceso fotocatalítico permitió alcanzar los estándares de calidad para la categoría A según NTON 05-027-05, se recomienda a directores de producción en industrias generadoras de aguas residuales organizar la posibilidad de reutilizar el agua tratada en procesos no potables para esta empresa o cualquier planta generadora de aguas residuales con carga microbiana, como riego de áreas verdes, lavado de áreas exteriores o en procesos de enfriamiento no crítico. Esto podría reducir significativamente la huella hídrica de la empresa.

Se sugiere a gerentes de proyectos o inversionistas. realizar un análisis económico detallado del proceso fotocatalítico, incluyendo los costos de inversión, operación y mantenimiento. Para determinar la viabilidad económica de implementar este método en la empresa Vegyfrut y otras industrias similares.

Aunque el presente estudio se enfocó en la remoción de carga microbiológica, se recomienda a futuros investigadores evaluar la eficiencia del mismo método frente a diferentes contaminantes químicos emergentes, residuos de plaguicidas o compuestos orgánicos persistentes en el agua residual según qué tipo de aguas residuales genera una industria alimentaria o de cualquier tipo.

Esencialmente, se recomienda al departamento de RSE y ONGs locales implementar programas de capacitación y concientización para los trabajadores de la empresa Vegyfrut y la comunidad aledaña, con el objetivo de promover prácticas más sostenibles en el manejo de aguas residuales. Se insta a adoptar un enfoque integral de gestión del recurso hídrico que incluya no solo el tratamiento efectivo de efluentes, sino también la reducción en la generación de residuos líquidos, el reciclaje de agua y el cumplimiento continuo de la normativa ambiental, fortaleciendo así su compromiso con la sostenibilidad y la responsabilidad social empresarial.

IX. Nomenclatura

Tabla 19.

Descripción de nomenclatura

Símbolo	***Descripción***	***Unidades***
a	Coeficiente en ecuaciones de regresión lineal	adim
B	Coeficiente en ecuaciones de regresión lineal	adim
C	Concentración de coliformes	(NMP/1000 mL)
df	Grados de libertad en análisis estadístico	adim
F	Estadístico F en ANOVA	adim
H	Hipótesis (nula o alternativa)	adim
MC	Media cuadrática en ANOVA	adim
N	Número de muestras o réplicas	adim
n	Número de cada dato	adim
p	Valor p en pruebas estadísticas	adim
r	Coeficiente de correlación de Pearson	adim
R	Coeficiente de correlación múltiple	adim
SC	Suma de cuadrados	adim
S/N	Relación señal/ruido	adim
t	Estadístico t en pruebas de hipótesis	adim
X_i	Numero de prueba	adim
λ	Longitud de onda	Nm
%remoción	Porcentaje de remoción de coliformes	adim

Fuente: Elaboración Propia

X. Referencias bibliográficas

Alegre, V., & Rosales, S. (2017). Influencia del tipo de fotocatalisis y tiempo en el tratamiento de aguas residuales textiles. Huancayo : Universidad Nacional del Centro del Perú.

Ali, I., Asim, M., & Khan, T. A. (2012). Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. . *Journal of Environmental Management*, 170–183.

Amarildo, E. (2017). *Aguas residuales en el Perú, problemática y uso en la agricultura. repositorio digital de recursos hídricos.*

Bermejo, M. (2018). *Fotocatálisis y su capacidad descontaminante. Aplicación en Gran Via.* Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Bevilacqua, E. (2004). *Health and Safety Manager Tioxide.*

Bolívar Marín, Y. (2020). *Estudio comparativo de los efectos del funcional de correlación-intercambio sobre las propiedades estructurales y electrónicas del Rutilo.*

Buxbaum, G., & Pfaff, G. (2005). *Industrial inorganic pigments.* Wiley-VCH.

C, V. (2016). Tratamiento de aguas residuales mediante la combinación de técnicas avanzadas de Oxidación y biofiltros. Las Palmas : Universidad de las Palmas de Gran Canaria.

Cabañas Vargas, M. P. (09 de enero de 2019). *Luz solar y TiO_2 para eliminar patógenos contenidos en agua de pozo: comportamiento de la fotocatálisis.* Obtenido de Revisa Académica, Universidad Autónoma de Yucatán: https://www.redalyc.org/journal/467/46760427001/html/

Cabañas, D., Mota, V., & Ruiz, J. (2019). *Luz solar y TiO_2 para eliminar patógenos contenidos en agua de pozo: comportamiento de la fotocatálisis.* Yucatán-México: Ingeniería Revista Académica de la Universidad Autónoma de Yucatán.

Campbell Cuarezma, E. S., Rodríguez Rodríguez, M. d., & Martínez Iglesia, T. d. (2019). *Análisis de parámetros físico-químicos y microbiológicos del agua potable del Recinto Universitario Rubén Darío de la UNAN-Managua.* Managua.

Casierra, H. (2016). *Desinfeccion de agua residual doméstica mediante un sistema de tratamiento acoplado con fines de reúso.* Colombia : Tecnologia y Ciencia del Agua.

Crispin, R., & Inga, J. (2015). *Estudio de la influencia de la temperatura, ph y tiempo de permanencia en el tratamiento de aguas residuales municipales del barrio de San Antonio mediante un reactor fotocatalitico a nivel laboratorio.* Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú.

Cuenca, U. d. (12 de abril de 2020). *UCUENCA*. Obtenido de UCUENCA: https://www2.ucuenca.edu.ec/component/content/article/233-espanol/investigacion/blog-de-ciencia/1134-contaminantes-emergentes-en-el-agua?Itemid=437

Diebold, U. (2003). The surface science of titanium dioxide. *Surface Science Reports*, 53-229.

Eckenfelder, W. W. (2000). *Industrial Water Pollution Control.* McGraw-Hill.

Escuadra, S., Gomez, J., Altabás, L., Miguel, N., Lasheras, A., & Ormad, M. P. (2013). *Degradación de contaminantes persistentes presentes en aguas residuales mediante nano-fotocatálisis con TiO_2. Cientifico. Dpto. Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente.* Zaragoza, España: Grupo Calidad y Tratamiento de Aguas. Instituto Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA).

Garcés, L., Mejía, E., & Santamaria, J. (2004). La fotocatálisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de la Investigación*, 83-92.

Gómez Moreno, R., Fuccz Gamboa, J., Cárdenas Guzmán, M., & Campos Pinilla, C. (2007). *Comportamiento De Coliformes Fecales Como Indicadores Bacterianos De Contaminación Fecal En Diferentes Mezclas De Biosólido Y Estériles Utilizados Para La Restauración Ecológica De La Cantera Soratama, Bogotá.* Bogotá: Universitas Scientiarum Revista De La Facultad De Ciencias.

Gomez, E., Lasheras, A., & Ormad, B. (2015). *Aplicación de Nano-fotocatálisis con TiO_2 Como Tratamiento Final de Agua de Salida de Depuradora.* Obtenido

de Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente. Universidad de Zaragoza.

González, M. (Febrero de 2018). *Descontaminacion y Desinfección de las aguas residuales mediante Tecnología Electroquímica.* Obtenido de Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, CONACYT: https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1021/248

Gutiérrez García, S. N., & Gutiérrez García, D. B. (Febrero de 2020). Degradación fotocatalítica de cafeína presente en agua mediante el uso de perovskita $LaFeO_3$. San José, Costa Rica.

Hernandez Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación.* México D.F : McGraw - Hill / interamericana editores s.a.

Ingaruca, K. (2021). *Evaluación del tiempo de contacto y la concentración de nanopartículas de dióxido de titanio en la desinfección de las bacterias E.coli de las aguas residuales municipaes tratadas. .* Huancayo: Universidad Continental.

Jaramillo, B., & Pinzon, S. (2017). *Evaluación de la degradación de los residuos de los colorantes obtenidos de la Prácticas de Quimica II de la Universidad Tecnológica de Pereira, por el método de Fotocatálisis Heterogénea con Dióxido de Titanio (TiO_2) en Reactor Heliofotocatalic.* Colombia: Universidad Tecnologica de Pereira.

Jimenez, M. (2016). *Desarrollo de nuevas estrategias basadas en fotocatálisis solar para la regeneración de aguas de una insdustria agro-alimentaria.* Almeria - España: Universidad Almeriensis.

Khan, M. M., Adil, S. F., & Al-Mayouf, A. (2017). Metal oxides as photocatalysts. *Journal of Saudi Chemical Society*, 462-464.

Khan, U., Baden, D., Rein, K., Gardinali, P., & Arroyo, L. (2010). *UV and solar TiO_2 photocatalysis of brevetoxins (PbTxs).* Bioresource Technology.

Kumar, S. G., Rao K, S. R., & Devil, L. G. (2016). Brookite TiO_2-based materials: Synthesis, properties, and applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 10744-10766.

Leidy Oviedo Cuesta, V. M. (2023). *Tratamiento de aguas residuales en la Industria*

de Alimentos en Colombia mediante Electrocoagulación. Bogotá: Universidad EAN.

Liu, G., Yang, H. G., Pan, J., Yang, Y., Lu, G., & Cheng, H. M. (2016). Titanium dioxide crystals with tailored facets. *Chemical Reviews*, 9559-9612.

Mario Alcarraz Curi, J. I. (2 de Julio de 2010). *Tratamiento de efluentes de una planta procesadora de frutas*. Obtenido de Industrial Data: https://www.redalyc.org/pdf/816/81619984013.pdf

Metcalf , & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery.* McGraw-Hill.

Naldoni, A., Altomare, M., Zoppellaro, G., Liu, N., Kment, Š., Zbořil, R., & Schmuki, P. (2019). Photocatalysis with reduced TiO_2: From black TiO_2 to cocatalyst-free hydrogen production. *ACS Catalysis*, 345-364.

Ohtani, B., Prieto-Mahaney, O. O., Li, D., & Abe, R. (2010). What is Degussa (Evonik) P25? Crystalline composition analysis, reconstruction from isolated pure particles and photocatalytic activity test. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 179-182.

Pantoja, J. (2015). *Eficiencias comparativas de inactivacion de bacterias coliformes en efluentes municipales por fotolisis UV y por fotocatalisis TiO_2 caso depuradoras aguas de Salamanca. .* Salamanca - España: Revista Mexicana de Ingenieria Quimica.

Peavy, H. S., Rowe, D. R., & Tchobanoglous, G. (2018). *Environmental Engineering.* McGraw-Hill.

Pelaez, M., Nolan, N. T., Pillai, S. C., Seery, M. K., Falaras, P., & Kontos, A. G. (2012). A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. Applied Catalysis B: Environmental. *Applied Catalysis B: Environmental*, 331-349.

Peña, M. R. (21 de agosto de 2020). *Procesos de Oxidación avanzada en el tratamiento de agua.* Obtenido de Universidad Autónoma del Estado de México: http://hdl.handle.net/20.500.11799/109361

Portal del SICA. (1 de enero de 2013). Obtenido de Gestión de las Excretas y Aguas Residuales:

file:///C:/Users/ximen/Downloads/Gestion%20de%20las%20Excretas%20y%20Aguas%20Residuales%20en%20Nicaragua%20%20Situacion%20Actual%20y%20Perspectivas.pdf

Qasim, S. R., Motley, E. M., & Zhu, G. (2017). *Water Works Engineering: Planning, Design, and Operation.* Prentice Hall.

Reza, K., Kurny, A., & Gulshan, F. (2015). Parameters affecting the.

Rosen, M., Welarda, T., Lofquist, A., & Holmgran, J. (1998). Development of a New Process for Treatment of Pharmaceutical Waste Water. J Water Science & Technology.

Schneider, J., Matsuoka, M., Takeuchi, M., Zhang, J., Horiuchi, Y., Anpo, M., & Bahnemann, D. (2014). Understanding TiO_2 photocatalysis: Mechanisms and materials. *Chemical Reviews*, 9919-9986.

Sierra Bravo, R. (1983). *Ciencias sociales. Epistemología, lógica y metodología. Teoría y ejercicios. .* Madrid: Paraninfo.

Singh, C., Chaudhary, R., & Gandhi, K. (2013). Preliminary study on optimization of pH, oxidant and catalyst dose for high COD content: solar parabolic trough collector. Iranian Journal of Environmental Health Sciences & Engineering.

Terreros Castro, J. M. (2022). Análisis de la influencia de la fotocatálisis heterogénea en la concentración de coliformes totales en las aguas residuales de la Planta de Tratamiento de Jauja. Huancayo.

Weber, W. J., & Digiano, F. A. (1996). *Process Dynamics in Environmental Systems.* Wiley.

Zhang, J., Zhou, P., Liu, J., & Yu, J. (2014). New understanding of the difference of photocatalytic activity among anatase, rutile and brookite TiO_2. *Physical Chemistry Chemical Physics.*, 20382-20386.

XI. Anexos

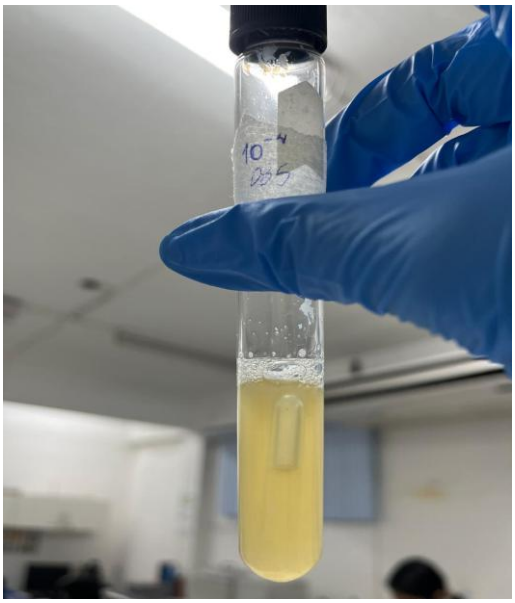
Tabla 20.

Índice NMP y límites de confianza del 95% para varias combinaciones de resultados positivos cuando se utilizan cinco tubos por dilución.

Combinación de tubos positivos			NMP/ 100mL	Límites de 95% de confianza		Combinación de tubos positivos			NMP/ 100mL	Límites de 95% de confianza	
				Inferior	Superior					Inferior	Superior
0	0	0	< 1.8	-	6.8	4	0	3	25	9.8	70
0	0	1	1.8	0.090	6.8	4	1	0	17	6.0	40
0	1	0	1.8	0.090	6.9	4	1	1	21	6.8	42
0	1	1	3.6	0.70	10	4	1	2	26	9.8	70
0	2	0	3.7	0.70	10	4	1	3	31	10	70
0	2	1	5.5	1.8	15	4	2	0	22	6.8	50
0	3	0	5.6	1.8	15	4	2	1	26	9.8	70
1	0	0	2.0	0.10	10	4	2	2	32	10	70
1	0	1	4.0	0.70	10	4	2	3	38	14	100
1	0	2	6.0	1.8	15	4	3	0	27	9.9	70
1	1	0	4.0	0.71	12	4	3	1	33	10	70
1	1	1	6.1	1.8	15	4	3	2	39	14	100
1	1	2	8.1	3.4	22	4	4	0	34	14	100
1	2	0	6.1	1.8	15	4	4	1	40	14	100
1	2	1	8.2	3.4	22	4	4	2	47	15	120
1	3	0	8.3	3.4	22	4	5	0	41	14	100
1	3	1	10	3.5	22	4	5	1	48	15	120
1	4	0	10	3.5	22	5	0	0	23	6.8	70
2	0	0	4.5	0.79	15	5	0	1	31	10	70
2	0	1	6.8	1.8	15	5	0	2	43	14	100
2	0	2	9.1	3.4	22	5	0	3	58	22	150
2	1	0	6.8	1.8	17	5	1	0	33	10	100
2	1	1	9.2	3.4	22	5	1	1	46	14	120
2	1	2	12	4.1	26	5	1	2	63	22	150
2	2	0	9.3	3.4	22	5	1	3	84	34	220
2	2	1	12	4.1	26	5	2	0	49	15	150
2	2	2	14	5.9	36	5	2	1	70	22	170
2	3	0	12	4.1	26	5	2	2	94	34	230
2	3	1	14	5.9	36	5	2	3	120	36	250
2	4	0	15	5.9	36	5	2	4	150	58	400
3	0	0	7.8	2.1	22	5	3	0	79	22	220
3	0	1	11	3.5	23	5	3	1	110	34	250
3	0	2	13	5.6	35	5	3	2	140	52	400
3	1	0	11	3.5	26	5	3	3	170	70	400
3	1	1	14	5.6	36	5	3	4	210	70	400
3	1	2	17	6.0	36	5	4	0	130	36	400
3	2	0	14	5.7	36	5	4	1	170	58	400
3	2	1	17	6.8	40	5	4	2	220	70	440
3	2	2	20	6.8	40	5	4	3	280	100	710
3	3	0	17	6.8	40	5	4	4	350	100	710
3	3	1	21	6.8	40	5	4	5	430	150	1100
3	3	2	24	9.8	70	5	5	0	240	70	710
3	4	0	21	6.8	40	5	5	1	350	100	1100
3	4	1	24	9.8	70	5	5	2	540	150	1700
3	5	0	25	9.8	70	5	5	3	920	220	2600
4	0	0	13	4.1	35	5	5	4	1600	400	4600
4	0	1	17	5.9	36	5	5	5	> 1600	700	-
4	0	2	21	6.8	40						

Figura 9.

Tubo positivo en medio Caldo Lauril sulfato de sodio.



Fuente: Elaboración propia – Laboratorio de Microbiolgía UNI, PIENSA.

Figura 10.

Baño Maria para incubacón.

Fuente: Elaboración propia – Laboratorio de Microbiolgía UNI, PIENSA.

Figura 11.

Incubación de tubos con caldo verde brillante para determinación de coliformes

Fuente: Elaboración propia – Laboratorio de Microbiolgía UNI, PIENSA.

Figura 12.

pH inicial de la muestra.

Fuente: Elaboración propia – Laboratorio de Microbiolgía UNI, PIENSA.

Figura 14.

pH ajustado a 6.00

Figura 13.

pH ajustado a 7.00

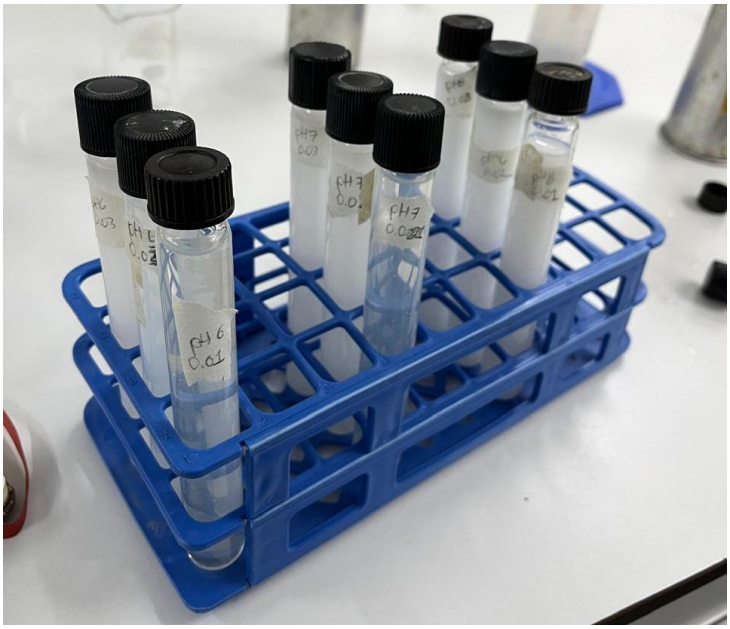
Fuente: Elaboración propia – Laboratorio de Microbiolgía UNI, PIENSA.

Figura 16.

pH ajustado a 8.00

Figura 15.

Preparación de muestras con catalizador.



Fuente: Elaboración propia – Laboratorio de Microbiolgía UNI, PIENSA.

Figura 18.

Exposición de las muestras con Catalizador a la luz UV

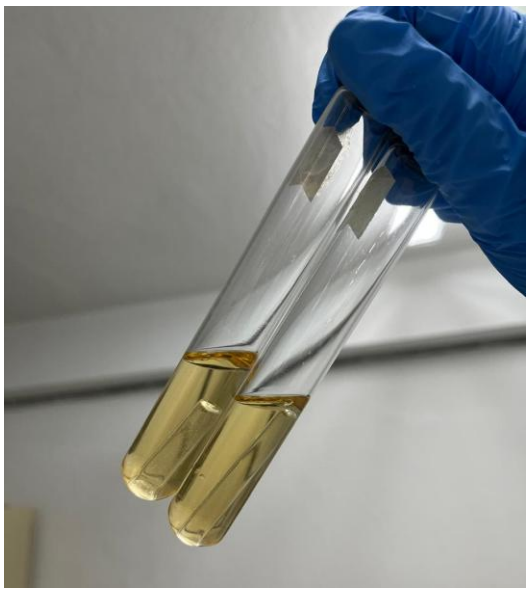
Figura 17.

Preparación de medios con catalizador

Fuente:
Elaboración propia – Laboratorio de Microbiolgía UNI, PIENSA.

Figura 19.

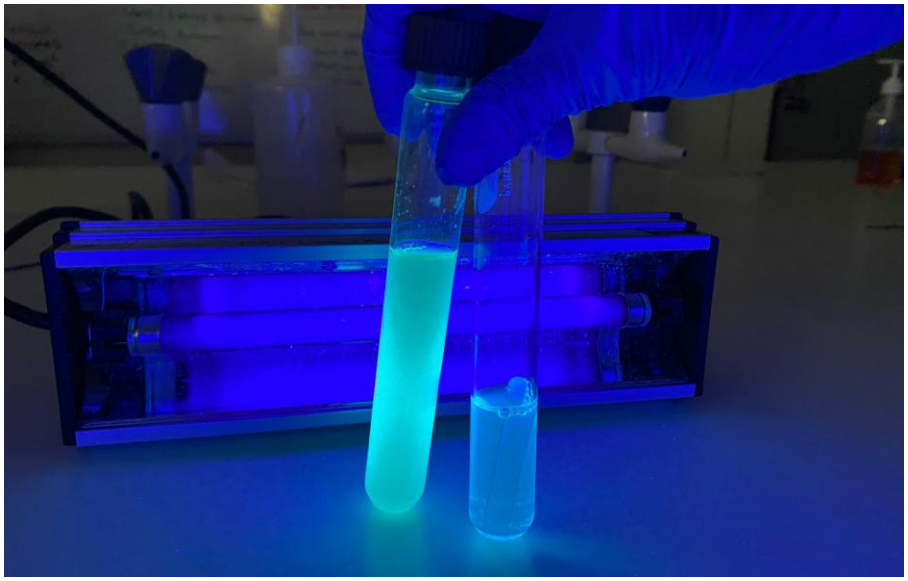
Tubos negativos para E. coli



Fuente: Elaboración propia – Laboratorio de Microbiolgía UNI, PIENSA

Figura 20.

Tubo positivo a E. coli



Fuente: Elaboración propia – Laboratorio de Microbiolgía UNI, PIENSA

Figura 21.

Preparación de medios de cultivo para someterse a autoclave

Fuente: Fuente: Elaboración propia – Laboratorio de Microbiolgía UNI, PIENSA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
ÁREA DEL CONOCIMIENTO DE AGRICULTURA
SECRETARIA DE ÁREA ACADÉMICA

HOJA DE MATRICULA
AÑO ACADEMICO 2025

No. Recibo 52131 **No. Inscripción** 437

NOMBRES Y APELLIDOS: Ximena Gabriela Mejía García

CARRERA: INGENIERÍA QUÍMICA **CARNET:** 2019-0767u **TURNO:** Diurno

PLAN DE ESTUDIO: 2015 **SEMESTRE:** PRÍMER SEMESTRE 2025 **FECHA:** 12/05/2025

No.	ASIGNATURA	GRUPO	AULA	CRED.	F	R
1	ULTIMA LINEA					

F:Frecuencia de inscripciones de Asignatura R: Retiro de Asignatura

GAPEÑA

GRABADOR

FIRMA Y SELLO DEL FUNCIONARIO

FIRMA DEL ESTUDIANTE

cc:ORIGINAL:ESTUDIANTE - COPIA:EXPEDIENTE.

IMPRESO POR SISTEMA DE REGISTRO ACADEMICO EL 12-may.-2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
ÁREA DEL CONOCIMIENTO DE AGRICULTURA
SECRETARIA DE ÁREA ACADÉMICA

HOJA DE MATRICULA
AÑO ACADEMICO 2025

No. Recibo

No. Inscripción 329

NOMBRES Y APELLIDOS: Dayana Marcela Ruiz Flores

CARRERA: INGENIERÍA QUÍMICA

CARNET:

TURNO: Diurno

PLAN DE ESTUDIO: 2015

SEMESTRE: PRIMER SEMESTRE 2025

FECHA: 12/02/2025

No.	FORMA DE CULMINACION DE ESTUDIOS
1	ULTIMA LINEA

F:Frecuencia de inscripciones de Asignatura R: Retiro de Asignatura

GAPEÑA

GRABADOR

FIRMA Y SELLO DEL FUNCIONARIO

FIRMA DEL ESTUDIANTE

cc:ORIGINAL:ESTUDIANTE - COPIA:EXPEDIENTE.

IMPRESO POR SISTEMA DE REGISTRO ACADEMICO EL 12-may.-2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
AREA DE CONOCIMIENTO DE AGRICULTURA

SECRETARIA DE ÁREA ACADÉMICA

F-8:CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA

El Suscrito Secretario del **ÁREA DEL CONOCIMIENTO DE AGRICULTURA** hace constar que:

MEJÍA GARCÍA XIMENA GABRIELA

Carné: **2019-0767U** Turno: **Diurno** Plan de Asignatura: **2015** de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, ha aprobado todas las asignaturas correspondientes a la carrera de **INGENIERÍA QUÍMICA**, en el año 2024 y solo tiene pendiente la realización de una de las formas de culminación de estudio.

Se extiende la presente **CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA**, a solicitud del interesado en la ciudad de Managua, a los ocho días del mes de enero del año dos mil veinte y cinco.

Atentamente,

SECRETARIA ACADÉMICA DE DACA
REPÚBLICA DE NICARAGUA
SA - DACA - UNI

Msc. María Esther Baltodano Pilarte
SECRETARIO DE ÁREA ACADÉMICA

IMPRESO POR SISTEMA DE REGISTRO ACADEMICO EL 08-ene.-2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
AREA DE CONOCIMIENTO DE AGRICULTURA
SECRETARIA DE AREA ACADEMICA

SECRETARIA DE ÁREA ACADÉMICA

F-8:CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA

El Suscrito Secretario del **ÁREA DEL CONOCIMIENTO DE AGRICULTURA** hace constar que:

RUIZ FLORES DAYANA MARCELA

Carné: **2019-0894U** Turno: **Diurno** Plan de Asignatura: **2015** de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, ha aprobado todas las asignaturas correspondientes a la carrera de **INGENIERÍA QUÍMICA**, en el año 2024 y solo tiene pendiente la realización de una de las formas de culminación de estudio.

Se extiende la presente **CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA**, *a solicitud del interesado en la ciudad de Managua*, a los veinte y dos días del mes de julio del año dos mil veinte y cuatro.

Atentamente,

Msc. María Esther Baltodano Pilarte
SECRETARIO DE ÁREA ACADÉMICA

IMPRESO POR SISTEMA DE REGISTRO ACADEMICO EL 22-jul.-2024