

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE**  
**INGENIERÍA QUÍMICA**



**“DEGRADACION DEL COLORANTE TARTRAZINA MEDIANTE  
EL PROCESO INTEGRADO DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA  
Y ELECTROCOAGULACIÓN”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN  
INGENIERIA QUIMICA**

**AUTORES**

**ROBERTH GARCIA BALTAZAR**

**GINA PAOLA LAZO FUENTES**

**ASESOR**

**JUAN TAUMATURGO, MEDINA COLLANA**

Línea de investigación: Ingeniería y tecnología










Callao, 2023

PERÚ

## Document Information

Analyzed document	TESIS FINAL 2023 GARCIA Y LAZO.pdf (D179359095)
Submitted	2023-11-20 21:29:00 UTC+01:00
Submitted by	
Submitter email	fiq.posgrado@unac.edu.pe
Similarity	11%
Analysis address	fiq.posgrado.unac@analysis.arkund.com

## Sources included in the report

SA	<b>Universidad Nacional del Callao / 10. TESIS - TUPIA MONTES-VALERIO CLAUDIO.pdf</b> Document 10. TESIS - TUPIA MONTES-VALERIO CLAUDIO.pdf (D163882467) Submitted by: fiq.investigacion@unac.edu.pe Receiver: fiq.investigacion.unac@analysis.arkund.com	 8
SA	<b>Universidad Nacional del Callao / INFORME FINAL- JUAN MEDINA COLLANA.pdf</b> Document INFORME FINAL- JUAN MEDINA COLLANA.pdf (D146049465) Submitted by: fiq.investigacion@unac.edu.pe Receiver: fiq.investigacion.unac@analysis.arkund.com	 6
SA	<b>Universidad Nacional del Callao / TESIS FINAL RAMOS AUCCASI-JULCARIMA LAURA-AGUIRRE MITMA.pdf</b> Document TESIS FINAL RAMOS AUCCASI-JULCARIMA LAURA-AGUIRRE MITMA.pdf (D148721213) Submitted by: fiq.investigacion@unac.edu.pe Receiver: fiq.investigacion.unac@analysis.arkund.com	 4
SA	<b>Universidad Nacional del Callao / TESIS BLAS-CONISLLA (2).pdf</b> Document TESIS BLAS-CONISLLA (2).pdf (D120150193) Submitted by: fiq.posgrado@unac.edu.pe Receiver: fiq.posgrado.unac@analysis.arkund.com	 12
SA	<b>Proyecto Titulacion Final 2022 Sotalin.pdf</b> Document Proyecto Titulacion Final 2022 Sotalin.pdf (D131231907)	 3
SA	<b>Universidad Nacional del Callao / 4.pdf</b> Document 4.pdf (D109764661) Submitted by: fiq.posgrado@unac.edu.pe Receiver: fiq.posgrado.unac@analysis.arkund.com	 4
SA	<b>Universidad Nacional del Callao / TESIS AVILES-PORTILLA.pdf</b> Document TESIS AVILES-PORTILLA.pdf (D120136631) Submitted by: fiq.posgrado@unac.edu.pe Receiver: fiq.posgrado.unac@analysis.arkund.com	 2
SA	<b>TESIS FINAL1.pdf</b> Document TESIS FINAL1.pdf (D40510541)	 2
SA	<b>TESIS FINALISIMA.pdf</b> Document TESIS FINALISIMA.pdf (D40606072)	 1

## **INFORMACIÓN BÁSICA**

**FACULTAD:** INGENIERÍA QUÍMICA

**UNIDAD DE INVESTIGACIÓN:** FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

### **TITULO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:**

“DEGRADACIÓN DEL COLORANTE TARTRAZINA MEDIANTE EL PROCESO INTEGRADO DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA Y ELECTROCOAGULACIÓN”

### **AUTORES/ CODIGO/ DNI:**

ROBERTH GARCIA BALTAZAR / 0009-0008-4099-7550 / 43564338

GINA PAOLA LAZO FUENTES / 0009-0003-6952-6633 / 44356835

### **ASESOR/ CODIGO ORCID/ DNI**

JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA/ 0000-0002-3625-8308 / 06213328

### **LUGAR DE EJECUCIÓN:**

LABORATORIO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

**UNIDAD DE ANÁLISIS:** SOLUCION SINTETICA DEL COLORANTE TARTRAZINA EN LA DEGRADACION MEDIANTE UN PROCESO INTEGRADO

### **TIPO/ ENFOQUE/ DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:**

APLICADA, CUANTITATIVO Y EXPERIMENTAL

**TEMA OCDE:** 2.04.02 INGENIERÍA DE PROCESOS

## **HOJA DE REFERENCIA DL JURADO Y APROBACIÓN**

La presente tesis fue sustentada por el señor bachiller Roberth GARCIA BALTAZAR y la señora bachiller Gina Paola LAZO FUENTES, ante el JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS conformado por los siguientes Profesores Ordinarios:

Dr. RODRIGUEZ TARANCO, OSCAR JUAN	PRESIDENTE
Dr. AVELINO CARHUARICRA CARMEN GILDA	SECRETARIO
Mg REYNA MENDOZA GLADIS ENITH	VOCAL
Mg. ROJAS ROJAS VICTORIA YSABEL	VOCAL
Dr. JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA	ASESOR

LIBRO 01

N° ACTAS: 063

N° FOLIOS: 061

FECHA DE APROBACION DE LA TESIS

BELLAVISTA, 08 DE DICIEMBRE 2023

RESOLUCION DEL COMITÉ DIRECTIVO DE LA UNIDAD DE POSGRADO:

Resol. N° 167-2023-RCD-UPG-FIQ-UNAC.

## **DEDICATORIA**

A Dios por ser mi guía, a mis padres por enseñarme a nunca rendirme y a mi esposa, quien ha sido mi roca y mi apoyo constante durante este viaje. Su amor, aliento, paciencia y comprensión han sido fundamentales para alcanzar esta meta. Este logro es tanto tuyo como mío.

**Roberth García Baltazar.**

Esta Tesis fruto de mi esfuerzo y constancia va dedicado a Dios quien siempre me da fuerzas para continuar y guía mi camino y me llena de sabiduría para mejorar día a día en el ámbito profesional. Dedico este logro profesional para aquellas personas que se encuentran caminando contra la corriente al final de la meta valdrá todo el esfuerzo.

**Gina Paola Lazo Fuentes.**

## **AGRADECIMIENTO**

Hoy, al culminar esta etapa de mi vida, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios por guiarme y darme fuerzas en los momentos difíciles. A mi amada esposa, por su amor y apoyo incondicional. A mi familia, por creer en mí y brindarme su cariño y respaldo. A mi asesor, por su guía y sabiduría en este camino. Este logro es el resultado del esfuerzo conjunto de todos nosotros.

Agradezco principalmente a Dios quien me guía y da fortaleza para seguir adelante, quien hace realidad este objetivo, a todas las personas de mi entorno por su comprensión apoyo y estímulo constante a lo largo de este proceso. A mi amado esposo por ser la motivación de mi vida mi orgullo y el apoyo constante para culminar esta meta, gracias por confiar siempre en mí.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	3
ÍNDICE DE FIGURAS .....	4
ÍNDICE DE ABREVIATURAS .....	6
RESUMEN .....	7
ABSTRACT .....	8
INTRODUCCION .....	9
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	11
1.2 Formulación del problema.....	12
1.2.1 Problema General.....	12
1.2.2 Problemas Específicos.....	12
1.3 Objetivos .....	12
1.3.1 Objetivo General .....	12
1.3.2 Objetivos específicos .....	12
1.4 Justificación.....	13
1.5 Delimitantes de la Investigación .....	13
1.5.1 Teórico.....	13
1.5.2 Temporal.....	13
1.5.3 Espacial .....	14
II. MARCO TEORICO.....	15
2.1 Antecedentes .....	15
2.1.1 Antecedentes internacionales .....	15
2.1.2 Antecedentes Nacionales .....	17
2.2 Bases Teóricas.....	19
2.2.1 Colorante .....	19
2.3 Marco Conceptual .....	33
2.3.1 Tartrazina.....	33
2.3.2 Cinética de reacción de degradación de la tartrazina.....	34
2.3.3 Parámetros que afectan el Proceso .....	35
2.4 Definición de Términos Básicos .....	38
III. HIPOTESIS Y VARIABLES.....	41

3.1	Hipótesis (general y específicas).....	41
3.1.1	Operacionalización de variables .....	42
IV.	METODOLOGIA DEL PROYECTO.....	43
4.1	Diseño Metodológico.....	43
4.2	Método de la Investigación.....	43
4.3	Población y Muestra.....	50
4.4	Lugar de estudio.....	50
4.5	Técnicas e Instrumentos para la Recolección de la Información.....	50
4.5.1	Equipos y materiales.....	51
4.6	Análisis y Procesamiento de Datos .....	54
4.7	Aspectos Éticos de Investigación .....	57
V.	RESULTADOS.....	58
5.1	Resultados descriptivos .....	58
5.1.1	Resultados experimentales de los procesos de cavitación .....	58
5.1.2	Resultados experimentales de los procesos de Electrocoagulación....	62
5.1.3	Resultado experimental del proceso integrado con los parámetros....	69
5.2	Resultados inferenciales .....	73
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	78
6.1	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados .....	78
6.2	Contrastación de los resultados con otros estudios similares. ....	78
VII.	CONCLUSIONES.....	80
VIII.	RECOMENDACIONES .....	81
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	82
	ANEXOS .....	86
	ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA .....	87
	ANEXO 2: FOTOGRAFÍAS DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL .....	88



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla1	Clasificación de los colorantes según su naturaleza .....	20
Tabla 2	Tecnologías para la remoción de colorantes ventajas y desventajas	21
Tabla 3	Tecnologías usadas para la remoción de colorantes .....	22
Tabla 4	Características físicas y químicas de la tartrazina.....	24
Tabla 5	Tabla de operacionalización de variables.....	42
Tabla 6	Factores y niveles de cavitación hidrodinámica propuestos.....	46
Tabla 7	Matriz de experimentación del proceso de cavitación hidrodinámica	46
Tabla 8	Diseño experimental del proceso de cavitación hidrodinámica .....	47
Tabla 9	Factores y niveles del proceso de electrocoagulación propuestos.....	47
Tabla 10	Matriz de experimentación del proceso de electrocoagulación .....	48
Tabla 11	Diseño experimental del proceso de electrocoagulación.....	49
Tabla 12	Diseño experimental del proceso integrado con los parámetros .....	50
Tabla 13	Resultados de los pruebas de cavitación hidrodinámica .....	58
Tabla 14	Condiciones del proceso de cavitación hidrodinámica .....	59
Tabla 15	Resultados de las pruebas del proceso electrocoagulación .....	62
Tabla 16	Condiciones del proceso de electrocoagulación .....	64
Tabla 17	Intensidad de corriente en función de tiempo de electrocoagulación	68
Tabla 18	Factores y nivel del proceso integrado obtenidos .....	69
Tabla 19	Resultados del proceso integrado, según nuestro diseño .....	70
Tabla 20	Condiciones iniciales y finales del proceso integrado.....	70
Tabla 21	Análisis de varianza (Anova) del proceso cavitación hidrodinámica	75
Tabla 22	Resumen del modelo utilizado para la degradación de tartrazina ....	75
Tabla 23	Análisis de varianza (Anova) del proceso de electrocoagulación .....	75
Tabla 24	Resumen del modelo utilizado para la degradación de tartrazina .....	76
Tabla 25	Análisis de varianza del análisis de regresión del proceso integrado	76
Tabla 26	Resumen del modelo utilizado para la degradación de tartrazina ....	76
Tabla 27	Matriz de consistencia.....	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estructura de la tartrazina (amarillo-5), colorante azoico .....	23
Figura 2 Principio de cavitación en un tubo venturi .....	25
Figura 3 Crecimiento y colapso de una burbuja o cavidad .....	26
Figura 4 Representación típica de la presión en la cavitación hidrodinámica ...	27
Figura 5 Configuración del cavitador basado en múltiples orificios .....	29
Figura 6 Gráfica de electrocoagulación de celda electrolítica .....	30
Figura 7 Arreglo monopolar conectado en paralelo .....	37
Figura 8 Arreglo monopolar conectado en serie .....	37
Figura 9 Diseño de la investigación .....	43
Figura 10 Gráfica del equipo experimental del proceso integrado.....	45
Figura 11 Equipo experimental del proceso integrado .....	51
Figura 12 Placa de orificios acondicionada a una unión universal .....	52
Figura 13 Electrodo en el tanque para el proceso de electrocoagulación .....	53
Figura 14 Equipo de espectrofotómetro de rastreo spectroquest de único .....	53
Figura 15 Espectro de absorción del colorante tartrazina e - 102 .....	55
Figura 16 Muestras de 2 y 8 ppm de colorante tartrazina e -102 .....	56
Figura 17 Curva de calibración en función de la concentración de tartrazina ...	57
Figura 18 Efecto de las presiones en la concentración 2 ppm vs tiempo.....	60
Figura 19 Efecto de las presiones en la concentración 8 ppm vs tiempo.....	61
Figura 20 Porcentaje de remoción del colorante en cada experimento.....	61
Figura 21 Ln de la concentración de tartrazina 2 y 8 ppm vs tiempo .....	62
Figura 22 Efecto del potencial eléctrico y NaCl en la degradación de 2 ppm....	65
Figura 23 Efecto del potencial eléctrico y NaCl en la degradación de 8 ppm....	66
Figura 24 Porcentaje de remoción de tartrazina en cada experimento .....	66
Figura 25 Ln de concentración de 2 ppm vs tiempo.....	67
Figura 26 Ln de concentración de 8 ppm vs tiempo.....	67
Figura 27 Intensidad de corriente en función del tiempo para 2 ppm.....	68
Figura 28 Intensidad de corriente en función del tiempo para 8 ppm.....	69
Figura 29 Efecto de parámetros en la degradación en el proceso integrado ....	71
Figura 30 Porcentaje de degradación de tartrazina en el proceso integrado ....	71
Figura 31 Ln de la concentración de tartrazina en el proceso integrado .....	72
Figura 32 Comportamiento de la intensidad de corriente, ph, T °C.....	72

Figura 33 Efectos de las variables del proceso de cavitación hidrodinámica...	73
Figura 34 Efecto de las variables del proceso de electrocoagulación .....	74

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

CA	: Corriente alterna
CD	: Corriente directa
DIGESA	: Dirección general de salud ambiental e inocuidad alimentaria
DQO	: Demanda química del oxígeno
EC	: Electrocoagulación
FCF	: Colorante azul brillante
HC	: Cavitación hidrodinámica
IDA	: Ingesta diaria admisible
LOPU	: Laboratorio de operaciones unitarias
ODS	: Objetivos de desarrollo sostenible
OMS	: Organización Mundial de la Salud
ONU	: Organización de las naciones unidas
RHB	: Colorante rodamina B
RR120	: Reactivo rojo 120
TLC	: Cromatografía de capa fina
UV-VIS	: Espectroscopia ultravioleta-visible

## RESUMEN

Una de las principales causas de contaminación de las aguas son los colorantes, como la tartrazina, cuya producción mundial alcanza los 3 millones de dólares y es el colorante más utilizado en industrias de alimentos. En el presente trabajo de investigación se estudia la influencia de un proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación para la degradación del colorante tartrazina, con los parámetros adecuados obtenidos de las pruebas experimentales. Para este proceso integrado se utilizó el diseño experimental factorial de tres factores dos de tres niveles, presión de 30, 50 y 70 PSI, potencial eléctrico de 7.7, 9.2 y 11.2 V, y un factor con dos niveles, además con NaCl de concentración de 0.25g/L y 0, en un tiempo de 90 min. Al reactor se ingresó 3.6 L de la solución sintética tartrazina de concentración de 2 ppm. Se recogieron muestras cada 30 min para ser analizadas mediante espectrofotometría UV-Vis. Los resultados muestran que a medida que los parámetros establecidos: presión, potencial eléctrico, NaCl y tiempo, se incrementan, se alcanza un mejor porcentaje de degradación de 90.97%, para una presión de 50 PSI, potencial eléctrico 11.2V y con NaCl de 0.25g/L en un tiempo de 90 min, con un consumo de energía de 16.57 KWh/L a una constante de velocidad de reacción  $26.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Por lo tanto, el proceso de integrado cavitación hidrodinámica y electrocoagulación representa una tecnología de tratamiento viable, amigable con el ambiente y de bajo costo para la degradación del colorante tartrazina.

**Palabras Clave:** *electrocoagulación, cavitación hidrodinámica, degradación, placa de orificios, electrodos de aluminio, colorante tartrazina.*

## RESUMO

Uma das principais causas da poluição das águas são os corantes, como a tartrazina, cuja produção global chega a 3 milhões de dólares e é o corante mais utilizado nas indústrias alimentícias. No presente trabalho de pesquisa estuda-se a influência de um processo integrado de cavitação hidrodinâmica e eletrocoagulação na degradação do corante tartrazina, com os parâmetros apropriados obtidos em testes experimentais. Para este processo integrado foi utilizado o planejamento experimental fatorial de três fatores, dois de três níveis, pressão de 30, 50 e 70 PSI, potencial elétrico de 7,7, 9,2 e 11,2 V, e um fator com dois níveis, também com NaCl na concentração de 0,25g/L e 0, no tempo de 90 min. 3,6 L da solução sintética de tartrazina com uma concentração de 2 ppm foram introduzidos no reator. Amostras foram coletadas a cada 30 minutos para serem analisadas por espectrofotometria UV-Vis. Os resultados mostram que à medida que os parâmetros estabelecidos: pressão, potencial elétrico, NaCl e tempo aumentam, atinge-se um melhor percentual de degradação de 90,97%, para pressão de 50 PSI, potencial elétrico 11,2 V e com NaCl de 0,25 g/L em um tempo de 90 min, com um consumo de energia de 16,57 kWh/L a uma constante de taxa de reação de  $26,7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Portanto, o processo integrado de cavitação hidrodinâmica e eletrocoagulação representa uma tecnologia de tratamento viável, ecologicamente correta e de baixo custo para a degradação do corante tartrazina.

**Palavras chaves:** Eletrocoagulação, Cavitação hidrodinâmica, degradação, placa de orifício, eletrodos de alumínio, corante tartrazina.

## INTRODUCCION

En la sociedad actual, los recursos naturales cada vez son más escasos, siendo el recurso hídrico uno de ellos, el cual permite la sostenibilidad del medio ambiente y se encuentra en un agotamiento constante. A nivel mundial se estima que las aguas residuales presentan una cantidad de  $1,5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , es decir, seis veces más que el agua encontrada en los ríos de todo el mundo. De esta cantidad, solo el 20% ha sido sometido a algún tipo de tratamiento remedial, el resto es vertido directamente a cuerpos de agua[1]

Una de las causas más graves de contaminación de ríos y lagos, afectando la biodiversidad de la zona y la salud de las personas que utilizan este recurso hídrico, es la liberación de aguas residuales provenientes de las distintas industrias. Las cuales son un reto en su tratamiento porque están constituidos de componentes orgánicos e inorgánicos, y algunos son contaminantes tóxicos y recalcitrantes, que impiden su degradación únicamente por procesos biológicos[2].

Cada año se exacerban los desafíos asociados con la gestión sustentable del agua. Por ese motivo, es imperativo seguir y fortalecer los compromisos globales para proteger un futuro sostenible. El cumplimiento de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos en la agenda 2030 dependen en gran medida de la gestión del agua mejorada (ONU, 2022)[3].

En el Perú, existen más de 300 productos que contienen tartrazina y están en el mercado el cual se demuestra en el informe realizado por DIGESA, además la Organización Mundial de la Salud (OMS) afirmó que existen cientos de productos con aditivos químicos que están circulando en nuestro país, y sus presentaciones incitan al consumo de conservantes y alimentos aditivos [4].

En la India, Manickam Sivakumar y Aniruddha B. Pandit en el año 2001, propusieron un nuevo método de tratamiento para una solución colorante por cavitación hidrodinámica, con el uso de múltiples placas de orificio. Este trabajo se ocupó de los efectos de la geometría de las múltiples placas de orificio utilizadas en la degradación de la solución (RHB) de un colorante catiónico, rodamina B de una industria textil y encontró una mejora sustancial en el grado de degradación de esta solución de tinte usando cavitación hidrodinámica[5].

Está demostrado que el colorante tartrazina, tiene un importante potencial para causar trastornos de hipersensibilidad, afectando del 0,6% al 2,9% de la población, con mayor incidencia en individuos intolerantes a los salicilatos o atópicos[6]. Existen diversos procesos químicos, biológicos, tecnológicos y nanotecnológicos, con la finalidad de degradar todas las impurezas, contaminantes, partículas y patógenos que se encuentran en las aguas residuales industriales, como por ejemplo la técnica de electrocoagulación, el cual es un procedimiento adecuado en soluciones acuosas de tartrazina para la remoción de color. Existen investigaciones que evidencian que los costos del procedimiento de electrocoagulación son inferiores a otros tratamientos, asimismo es una técnica viable y económica[7].

Los diferentes tratamientos a las aguas residuales de las diferentes industrias requieren de nuevos procesos, maquinarias, equipos elevando sus costos y generando residuos. Por este motivo el objetivo de la presente investigación es tratar una solución sintética conteniendo tartrazina mediante el proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación, obteniendo los parámetros adecuados y de esa manera tener un resultado óptimo y evaluar el porcentaje de degradación del colorante tartrazina, aportando en una visión a futuro, siendo una oportunidad para ser aplicada y realizada a escala industrial y a futuro ser incorporado en los tratamientos de aguas residuales que contengan este colorante.



## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Descripción de la realidad problemática

En la actualidad hay un déficit de agua potable disponible en el planeta para el consumo humano. Más del 80% de las aguas residuales de los países en vías de desarrollo se descargan sin tratamiento, contaminando ríos, lagos y zonas costeras un estudio reciente observo que en países desarrollados el 5.8% de la población estaba expuesta a aguas cuya calidad no estaba conforme con los estándares de la organización mundial de salud (OMS) (ONU 2009). Además, las aguas residuales vuelven a fluir hacia el ecosistema sin ser tratadas o reutilizadas [8].

Una de las principales causas de contaminación de las aguas son los colorantes, que se obtienen a partir del petróleo, como la tartrazina, cuya producción mundial alcanza los 3 millones de dólares y es el colorante más utilizado desde 1916[9], en muchos alimentos procesados para mejorar las características organolépticas de los alimentos resultantes. Sin embargo, la presencia de este colorante en las aguas residuales representa un problema ambiental, ya que este tipo de compuesto no puede eliminarse en su totalidad con los métodos de tratamientos convencionales[10].

Es importante tener en cuenta que la tartrazina es un aditivo alimentario que ha generado controversia entre los expertos en nutrición debido a que existen estudios que le otorgan un potencial dañino. Debido al incremento en la producción y uso de los colorantes en varios sectores industriales, existe una preocupación sobre el efecto que tienen éstos sobre los ecosistemas terrestres y acuáticos, relacionado a la coloración, incluso en bajas concentraciones de colorante menores a 1 mg/l son altamente visibles, la fuerte coloración puede tener efectos nocivos para la flora y fauna acuática, el más importante es la obstaculización del paso de la luz solar a través del agua, lo que puede llegar a eliminar los procesos de fotosíntesis y disminuir el oxígeno disuelto, limitando el crecimiento de las plantas acuáticas y los procesos de autodepuración[8].

Esto significa que una gran cantidad de colorantes, incluyendo la tartrazina, pueden terminar en nuestros ríos, lagos y mares, afectando negativamente el medio ambiente. Es por esto, que utilizando la ingeniería de la mano con la tecnología y creando, adaptando e ideando nuevos procesos se puede llegar a un aporte significativo con el ecosistema, como es el propósito de esta investigación, siendo eco amigable con el medio ambiente, de manera que la integración de dos procesos (cavitación y electrocoagulación) no generen residuos, demostrando ser factible y tener su aplicación a escala industrial en un futuro.

## **1.2 Formulación del problema**

### **1.2.1 Problema General**

¿En qué porcentaje se degradará el colorante tartrazina (E-102), por el proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación?

### **1.2.2 Problemas Específicos**

- ¿Cuáles son los parámetros de operación del proceso de cavitación hidrodinámica para la degradación del colorante de tartrazina?
- ¿Cuáles son los parámetros de operación del proceso de electrocoagulación para la degradación del colorante de tartrazina?

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Determinar el porcentaje de degradación del colorante tartrazina (E-102), por el proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Evaluar los parámetros de operación más adecuados del proceso de cavitación hidrodinámica para la degradación del colorante de tartrazina.
- Evaluar los parámetros de operación más adecuados del proceso de electrocoagulación para la degradación del colorante de tartrazina.

## **1.4 Justificación**

El recurso hídrico está en constante contaminación indiscriminada por las aguas residuales de las diferentes industrias, conteniendo colorantes sintéticos como tartrazina, sin un adecuado tratamiento al momento de verterlo en los cuerpos de agua finales, genera la necesidad de implementar e innovar nuevas tecnologías eco amigables para el medio ambiente y de esa forma contribuir al desarrollo sostenible, coadyuvando a conservar un ambiente más saludable para la sociedad. Este proyecto tiene como finalidad degradar la tartrazina en una solución sintética y de esta forma obtener parámetros adecuados, los cuales puedan ser usados en el tratamiento de aguas residuales de las diferentes industrias a mayor escala y conseguir importantes avances en la descontaminación de las aguas y de esa manera aportar en la sostenibilidad del medio ambiente, el cual es fundamental para la vida y la salud. La investigación tiene carácter tecnológico sustantivo y experimental, propone alternativas de solución y un enfoque en el tratamiento de efluentes de las industrias que utilizan como aditivo, el colorante tartrazina, mediante un proceso integrado eco amigable sostenible, viable, económica y sin emisión de residuos, siendo más eficiente e innovador.

## **1.5 Delimitantes de la Investigación**

### **1.5.1 Teórico**

La información recopilada y métodos innovadores deben ir en visión al cuidado humano y evitando en todos los parámetros la destrucción de los ecosistemas. Información de hidrodinámica, diseño, mecánica de fluidos, análisis por instrumentación, electrolisis y demás relacionados al tema de investigación.

### **1.5.2 Temporal**

Las pruebas experimentales del trabajo de investigación se desarrollaron entre los meses de Julio - octubre del año 2023.

### **1.5.3 Espacial**

El montaje y armado del equipo integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación para el proceso de degradación de tartrazina, se realizó en el laboratorio LOPU de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao.

## II. MARCO TEORICO

### 2.1 Antecedentes

#### 2.1.1 Antecedentes internacionales

En la investigación sobre la degradación del tinte Auramine O, se investigó el proceso de cavitación hidrodinámica como tecnología para la degradación en varios colorantes orgánicos. Los resultados mostraron que la tecnología de cavitación hidrodinámica tiene una alta mineralización y fuertes capacidades de generación de calor en los procesos de degradación de los contaminantes orgánicos. Dejando entrever una nueva estrategia para tratamiento de aguas residuales y reciclaje eficaz de la producción de calor. Se utilizó una placa de 6 orificios, una presión de 4,0 bar, un volumen de solución de 5 L y una concentración de 10 mg/l, logrando una tasa de degradación de AuramineO del 81,39 % en el momento del ciclo de 90 min. Se obtuvo 1082,52 kJ de energía térmica con una eficiencia térmica del 40,09 % durante un tiempo de ciclo de 30 min [11].

En el estudio del proceso Fenton para la degradación de colorantes azoicos, realizó una investigación sobre el comportamiento de la cavitación hidrodinámica, mediante un tubo Venturi a escala de laboratorio, para la decoloración del colorante naranja de metilo. Realizaron varias series experimentales: en la primera se estudió el efecto de la presión de entrada al cavitador manteniendo constante la concentración de colorante (5 ppm) y la temperatura (20 °C), se observó que la presión de entrada tuvo un efecto positivo hasta 4 bar, obtuvieron una decoloración máxima (alrededor del 32%) del colorante naranja de metilo a un pH= 2 y presión 4 bar después de un tiempo de 60 min de tratamiento. Los rendimientos no degradaron suficientemente el colorante naranja de metilo a niveles aceptables en tiempos cortos. Asimismo, realizaron experimentos con la adición de peróxido de hidrógeno la eficiencia de la combinación HC-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en las soluciones colorantes (cavitación hidrodinámica y peróxido de hidrógeno en condiciones

óptimas), mostraron el máximo rendimiento, utilizando una concentración de 0.005% v/v de peróxido de hidrógeno, pH= 2 y presión 4 bar después de un tiempo de 60 min de tratamiento, en este caso, el rendimiento de degradación fue del orden del 53%. Finalmente, se evaluó la eficiencia del proceso de cavitación hidrodinámica en presencia de metales (hierro y níquel) y peróxido de hidrógeno, demostrando un rendimiento de degradación cercano al 90%, significando que la presencia de hierro mejoró la eficiencia de todo el proceso de cavitación[12].

El estudio de parámetros para la degradación del reactivo rojo 120 mediante la cavitación hidrodinámica en la industria textil, dió a conocer el efecto de varios parámetros como la concentración de RR120 en líquido, la presión de funcionamiento, la temperatura del sistema, el pH y el efecto de un agente oxidante (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) en RR120 % examinaron la decoloración por cavitación hidrodinámica, obteniendo una cinética al parecer de primer orden, utilizando HC a 3,5 kg/cm<sup>2</sup>, 30 °C, pH = 2 y 10 mg/l concentración de colorante en solución acuosa, logrando un 74 % dedecoloración[13].

En la investigación de las conexiones de electrodos en la eficiencia de eliminación de tartrazina en soluciones acuosas, resaltó la influencia de las variables de electrocoagulación en la decoloración de Tartrazina mediante la utilización de la corriente directa. Se comparó la eficiencia de diferentes conexiones de electrodos y materiales (hierro, aluminio) para la eliminación del color. La densidad de corriente, el tiempo de electrólisis, la distancia entre electrodos, la concentración de electrolitos de soporte y el pH de la solución, siendo las variables que más influyeron en la eliminación del color. trabajaron con una celda electroquímica simple, luego estudiaron el efecto de cada variable por separado utilizando Tartrazina acuosa en modo discontinuo. Para una solución de 40 mg/l Tartrazina y 400 mg/l NaCl, con demanda química de oxígeno (DQO) de aproximadamente 30 mg/l, eliminando casi el 100% del color y el 90% de la DQO, cuando el pH= 5.78 aprox., el tiempo de electrólisis fue de 6 min

aprox., la densidad de corriente fue de  $120 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$  aprox. y la distancia entre electrodos fue de  $1.5 \text{ cm}$ [14].

Otro tipo de tecnología utilizada para la remoción de colorantes en aguas residuales, es la electrocoagulación, según Barrios-Ziolo L, Gaviria-Restrepo L, Agudelo E et al. se utilizó valores de densidad de corriente entre  $4.45$  y  $200 \text{ A}/\text{m}^2$ , alcanzó un porcentaje de remoción de color y DQO superiores al  $90$  y  $80\%$ , respectivamente, en tiempo de operación inferiores a  $120$  minutos para los diferentes colorantes evaluados. Asimismo, concluyeron que la cinética de remoción de color puede ser influenciada por el tipo de electrodo implementado, el cual puede ser de hierro, aluminio, grafito, acero, dióxido de titanio, plomo, platino, entre otros. Dicha tecnología fue favorecida por la aplicación de electrodos de óxido de titanio encontrándose porcentajes de remoción de color superiores al  $90\%$ [15].

La electrocoagulación de aguas residuales con contenido del colorante azoico tartrazina haciendo uso de electrodos hierro y aluminio, con la placa de hierro como electrodo de sacrificio, estuvo afectada de manera significativa por tres factores, según el estudio de Álvaro Arango Ruiz, los cuales se analizaron en el diseño experimental: densidad de corriente, pH y tiempo. Se tuvo como nivel óptimo del estudio, la densidad de corriente de  $43.23 \text{ A}/\text{m}^2$ , un  $\text{pH} = 4$ , el tiempo de  $12$  minutos, obtuvo una remoción de DQO de  $95,50\%$  y del color de  $99.40\%$ . Los resultados de este estudio permitieron establecer, que la electrocoagulación es una tecnología que puede utilizarse en soluciones acuosas de tartrazina para la remoción de color[16].

### **2.1.2 Antecedentes Nacionales**

En esta investigación, Pablo DIAZ, estudió la degradación de la tartrazina mediante la fotocatalisis solar heterogénea, utilizando el óxido de zinc como catalizador, y como fuente energética la energía solar. El experimento se llevó a cabo a nivel de laboratorio en un reactor batch. La

reducción de la concentración del colorante fue seguida mediante un espectrofotómetro UV y los resultados indicaron que el óxido de zinc es un excelente fotocatalizador para la degradación de la tartrazina, y se logró una disminución del 63 % al cabo de 20 minutos [17].

La Revista de Investigación Científica y Tecnológica Alpha Centauri, es una revista arbitrada y producida a nivel Internacional, donde argumenta diferentes artículos entre los cuales, se rescata un estudio, que tuvo como objetivo la identificación y cuantificación de colorantes sintéticos en bebidas expendidas en la ciudad de Trujillo. Se analizaron 9 bebidas carbonatadas y 3 refrescos instantáneos, y se usaron como patrones los colorantes Tartrazina, Amarillo Ocaso FCF, Rojo Allura y Azul Brillante FCF de uso comercial. Se usó la técnica analítica de Arata-Possetto para purificar los colorantes y para su extracción de las bebidas. La identificación se realizó mediante cromatografía en capa fina (TLC) y espectrofotometría visible, utilizando también esta última para la cuantificación de los colorantes en las bebidas. Se obtuvieron las longitudes de onda de máxima absorbancia para los colorantes patrón Tartrazina (427 nm), Amarillo Ocaso (481 nm), Rojo Allura (504 nm) y Azul Brillante (630 nm), logrando identificar la presencia de estos colorantes en las bebidas, lo cual guardó relación con lo identificado en la cromatografía. Se concluye que se puede utilizar la técnica de Arata-Possetto, la cromatografía en capa fina y la espectrofotometría visible para identificar y cuantificar colorantes presentes en las bebidas de manera confiable e identificaron que las concentraciones de colorantes sintéticos en las bebidas están dentro de los límites establecidos por la normativa[18].

La electrocoagulación es una técnica que implica la adición electrolítica de coagulantes iones metálicos al electrodo, estos iones, positivos, se absorbieron sobre los coloides, negativos, como ciertas sustancias químicas que ayudan a la coagulación en el método químico. Con el proceso se buscó remover la mayor cantidad de materia contaminante presente en el agua residual a tratarse. Para tal efecto se usaron



electrodos de hierro con las ecuaciones necesarias para obtener los resultados esperados y necesarios, según el amperaje y voltaje que cada uno exigió. En esta investigación se aplicó el proceso de electrocoagulación para tratar aguas residuales, muestras sintéticas de industria textil, se determinó las condiciones óptimas de operación del sistema de electrocoagulación con una configuración de los electrodos 3x2 y se observó que el pH de operación es 10, el cual hizo la diferencia de la mayoría de las investigaciones que realizó las pruebas con pH ácido, otro parámetro importante es la intensidad de corriente eléctrica, para este caso 15 amperios y 18 voltios los cuales incluyeron en la remoción de materia orgánica y color. Este procedimiento fue efectivo para remover compuestos refractarios de aguas residuales industriales se logró una eficiencia de remoción del 97,57% de Demanda Química Oxígeno y 99,11% de color, porcentaje comparado con el método de aplicación de químicos[19].

## **2.2 Bases Teóricas**

### **2.2.1 Colorante**

Los colorantes son sustancias químicas que se obtienen de manera natural o artificial dando a los alimentos y objetos diversos el color, son utilizados desde mucho tiempo atrás, los colorantes naturales se extraen de fuentes vegetales, animales o minerales, mientras que los colorantes artificiales se producen mediante procesos químicos [9], se pueden utilizar con varios fines: normalización del color de los ingredientes crudos, proporcionar color a alimentos que de otro modo no lo tendrían, recuperar la pérdida de color tras el procesamiento de los productos y aumentar el atractivo visual de los alimentos[20]

En la tabla 1 se describen y clasifican los diferentes tipos de colorantes existentes utilizados en el mundo, según su naturaleza.

**Tabla1****Clasificación de los colorantes según su naturaleza**

NATURALES		SINTETICOS	
Curcumina	Riboflavina	Tartrazina	
Clorofilas y clorofilinas	Cochinilla, ácido carmínico, carmines	Amarillo de quinoleína	
Complejos cúpricos de clorofilas y clorofilinas	Caramelo	Amarillo	ocaso
Carbón vegetal	Caramelo sulfito caustico	FCF/anaranjado S	
Annatto, norbixina	bixina, Caramelo amónico	Amaranto	
Extracto de pimentón, capsantina, capsorrubina	Caramelo sulfito amónico	Ponceau 4R	rojo cochinilla A
Licopeno	Carotenos	Eritrosina	
Luteina	Beta-apo-8-carotenal (C30)	Rojo Allura AC	
Betanina	Cantaxantina	Azul patente V	
Antocianinas	Oro	Indigotina,	carmin índigo
Carbonato cálcico		Azul brillante FCF	
Dióxido de titanio		Verde S	
Óxidos e hidróxidos de hierro		Negro brillante PN	
Aluminio		Marrón HT	
Plata		Litolrubina BK	

Nota: tomada de[20]

Las diferentes industrias utilizan los colorantes, dejando un remanente en los residuos acuosos, generando una importancia en la búsqueda de

métodos y tecnologías para su degradación o eliminación, asimismo contar con un tratamiento previo antes de ser vertidos finalmente a un cuerpo de agua, y cumplir con la normativa y estándares de límites permisibles para mantener un ecosistema amigable y libre de contaminantes en lo posible. Resultando métodos con mayores ventajas que otros[20].

La tabla 2 aporta conocimiento respecto al tipo de tecnologías usadas con ventajas y desventajas de las mismas.

**Tabla 2**

***Tecnologías para la remoción de colorantes ventajas y desventajas***

<b>Tecnologías</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Membranas	Eficaz para todos los colorantes con efluentes de alta calidad	Bajo volumen de vertimiento y producción de lodos, elevados costos
Electrocoagulación	Económicamente factible	Se necesita de tratamientos adicionales, como la floculación y filtración. Se produce lodos.
Adsorción	Diferentes tipos de adsorbentes con altas eficiencias para la remoción de diversos colorantes	Presenta altos costos para la recuperación y/o eliminación de los adsorbentes

Nota: tomada de[20]

Existen diversas tecnologías al paso del tiempo, para la degradación y eliminación de diferentes tipos de colorantes, los cuales dan mejores resultados para determinados colorantes, eliminando en un porcentaje mayor o menor de acuerdo a la tecnología utilizada, dichos resultados

obtenidos de diferentes investigaciones, se muestran en la siguiente tabla 3.

**Tabla 3**

**Tecnologías usadas para la remoción de colorantes**

<b>Tecnologías</b>	<b>Colorantes</b>	<b>Remoción (%)</b>	<b>Investigadores</b>
Membranas	Azul metileno	de 90.23	Foorginezhad y otros, 2017
Electrocoagulación	Colorantes textiles reactivos	97	Amour y otros, 2016
Biológico	Mezcla de colorantes	de 97.04	Barragan y otros, 2007
Oxidación avanzada	Rojo acido-114	88.3	Du, W.N., Chen, 2018
Degradación química	Azul brillante	99	Bouyakoub y otros, 2009
Adsorción	Azul metileno	de 92	Addaou y otros, 2012

Nota: Tomada de[20]

**2.2.2 Colorante Tartrazina**

Los colorantes sintéticos son sustancias químicas hidrosolubles o liposolubles, muy resistentes al calor, al pH, se sintetizan a partir de compuestos químicos inorgánicos. La normativa internacional de alimentos, Codex Alimentarios, establece un límite máximo permisible para su uso en alimentos. La necesidad de su uso se debe a que la mayoría de frutas, verduras, cereales en determinadas estaciones del año o a partir de procesos de transformación pierden su color natural, existe una constante preocupación por la salud ya que muchos de ellos no han sido producidos con fines alimentarios sino para utilizarse en textilería y pintura[21].

La tartrazina es un colorante artificial en polvo ampliamente utilizado en la industria alimentaria[21], conocida como amarillo 5 es un colorante

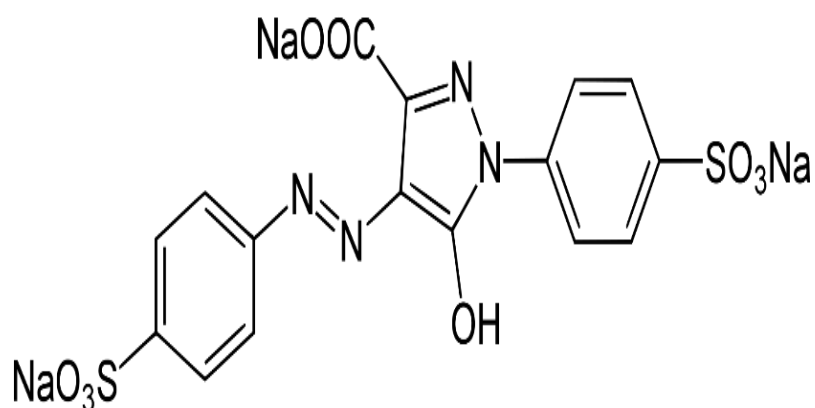
mono azoico derivado del petróleo cuyo nombre químico es: 5-hidroxi-1-(4-sulfonatofenil)-4-(4-sulfonatofenilazo)-4-pirozol-3-carboxilato trisódico, el uso de la tartrazina es muy amplia pudiendo obtener diferentes tonalidades, es muy estable a pH ácidos y básicos, a temperaturas extremas, es hidrosoluble, ofrece un color amarillo a los alimentos como sopas, fideos, galletas, chizitos, gelatinas, helados, dulces, caramelos, jugos, condimentos, fármacos y alimentos para mascotas. La mayor absorbancia de la tartrazina se obtiene en longitudes de onda entre 425 a 427 nm, es el más utilizado por que es fácilmente combinable con otros colorantes [22].

Es el colorante que da sospechas de presentar alergias y dejar residuos cancerígenos demostrados en 6 de 11 estudios. El valor ingesta diario admisible (IDA) de la tartrazina es 7.5 mg/kg de peso corporal[9].

En la figura 1 se muestra la estructura química del colorante tartrazina

### Figura 1

*Estructura de la tartrazina (amarillo-5), colorante azoico*



Nota: Tomada de [22].

En la Tabla 4 se aprecia el cuadro de características del colorante tartrazina.

**Tabla 4****Características físicas y químicas de la tartrazina**

Características	
CAS	12225-21-7
Nombre IUPAC	Trisodio 5 – hidroxí – 1 - (4 - sulfatofenil) - 4 - [(E) - (4 - sulfonatofenil) diazenil] - 1H – pirazol – 3 – carboxilato.
Nombre comercial	FD&C Amarillo N° 5 CI 19140
Formula	C <sub>16</sub> H <sub>9</sub> N <sub>4</sub> Na <sub>3</sub> O <sub>9</sub> S <sub>2</sub>
Índice de color	19140
Tipo	Azoico
Peso molecular	534.36 g/mol
Longitud de onda	425nm
Soluble	H <sub>2</sub> O, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

Nota: tomada de [23].

**2.2.3 Proceso Integrado de Cavitación Hidrodinámica y Electrocoagulación**

Se han desarrollado distintas tecnologías para el tratamiento de agua con residuos, en un menor número de etapas para mejorar la efectividad de los sistemas actuales se menciona la electrocoagulación, humedales artificiales, ultrafiltración y osmosis inversa, ozonización, procesos de oxidación avanzada, procesos foto catalíticos, cavitación hidrodinámica y cavitación acústica, entre otras alternativas propuestas. Existen investigaciones que demuestran que la combinación de varias técnicas intensifica el proceso de tratamiento y mejoran la eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales[24].

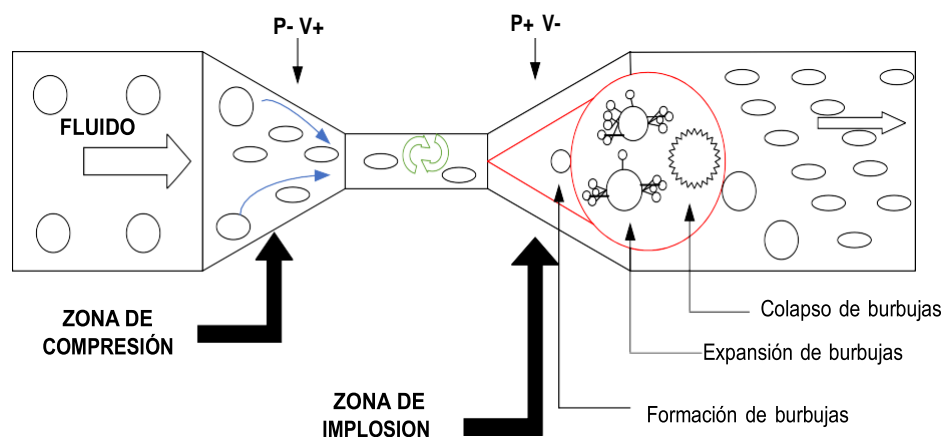
**La cavitación hidrodinámica.** Es un fenómeno que se produce cuando, sin cambio de temperatura, el agua o cualquier otro fluido pasa a gran velocidad a una región donde, su presión local se reduce a un valor que es menor que la tensión de sus vapores, de tal forma las moléculas que lo componen cambian inmediatamente a estado de vapor, dando lugar al surgimiento de cavidades (burbujas) de vapor en su seno, formando una estructura bifásica (liquido-vapor) y la condensación y colapso de

las burbujas al ser arrastradas con el fluido hacia regiones de presión más elevadas, el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, aplastando bruscamente las burbujas (colapsan) implosionan, este momento se caracteriza por una intensa turbulencia, formación de vórtices y pulsaciones de velocidad, presión y temperatura. Se compara con el proceso físico de la ebullición, la diferencia es que la cavitación es causada por una caída de la presión local por debajo de la presión de vapor, y la ebullición lo hace por encima de la presión ambiente local. Se hace un análisis a nivel nanométrico de los fenómenos que suceden en un fluido sometido a cavitación hidrodinámica, y los efectos que se producen producto de los referidos fenómenos. Produciendo dos efectos obteniendo grandes beneficios, siendo la acción dispersante de los líquidos procesados y la letalidad de los microorganismos existentes en los fluidos contaminados[25].

En la figura 2 se aprecia el principio de cavitación en un fluido que pasa por una zona de compresión, disminuyendo la presión y generando una zona de implosión (cambio de fase).

### Figura 2

*Principio de cavitación en un tubo Venturi*



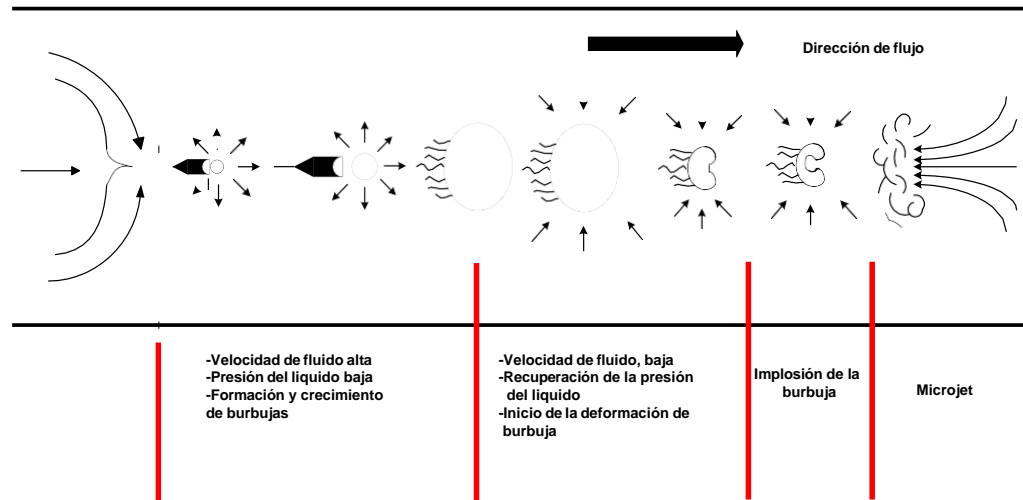
Nota: tomada de [26]

La expresión utilizada para el proceso de formación, expansión e implosión de burbujas, como producto de una violenta disminución de presión en el medio líquido corresponde a la cavitación. Este fenómeno

puede ser inducido en el seno de un líquido por medio de dos mecanismos, tensión y deposición de energía como se muestra en la Figura 3.

### Figura 3

#### *Crecimiento y colapso de una burbuja o cavidad*



Nota: tomada de [26]

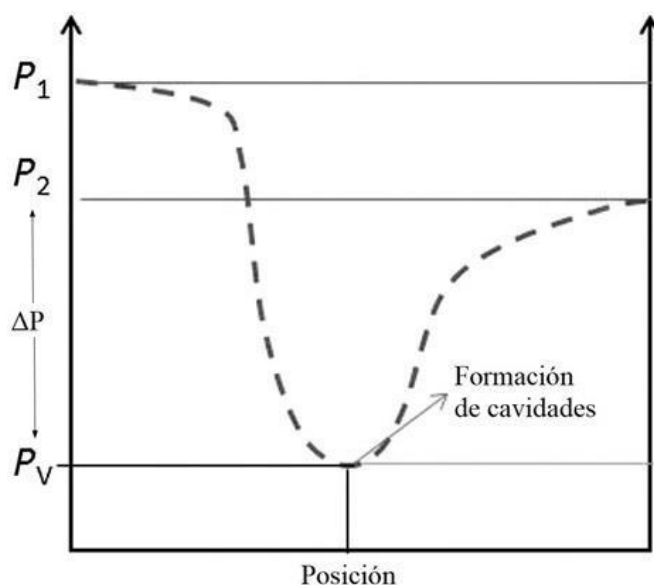
La combinación de ésta con otras técnicas de tratamiento de aguas residuales han sido objeto de estudio para diferentes contaminantes recalcitrantes logrando resultados muy favorables, Cabe señalar que los procesos de cavitación aplicados al tratamiento de aguas residuales tienen como beneficio, el aumento del índice de biodegradabilidad de la materia orgánica, favoreciendo el tratamiento biológico de las aguas residuales para lograr la completa mineralización de contaminantes[24]

La figura 4 representa gráficamente la variación de presión que genera el proceso de cavitación hidrodinámica.



#### Figura 4

Representa típico de la presión en la cavitación hidrodinámica.



Nota: tomada de [27].

#### ***Tipos de cavitación***

Existe cuatro tipos de cavitación que depende de las formas como la energía se absorbe en el líquido[26]:

- Cavitación hidrodinámica: se produce por pulpos de presión en virtud de los cambios de geometría en el conducto por donde circula el líquido.
- Cavitación acústica: se genera por ondas ultrasónicas en un líquido que producen cambios de presión local.
- Cavitación óptica: es producida por pulsación de fotones de alta intensidad (como los rayos láser), los cuales provocan la ruptura del líquido.
- Cavitación por partículas: es producida por el bombardeo de partículas elementales con alta energía focalizadas al interior de un líquido.

#### ***Ventajas de la cavitación hidrodinámica***

De acuerdo con pandit (2016), las ventajas de la tecnología de cavitación son las siguientes[26]:

- Una tecnología más ecológica que no requiere necesariamente productos químicos adicionales.
- Puede acoplarse con otros procesos de oxidación avanzada.
- Mejora el rendimiento de la instalación de tratamiento de efluentes existentes (mejora la eficiencia del reactor aeróbico, aumenta la biodegradabilidad del efluente, reduce la DQO del efluente, etc).
- Los sistemas de reactores basadas en cavitación pueden diseñarse y operarse prácticamente para cualquier presión y caudal.

### ***Reactores de cavitación hidrodinámica***

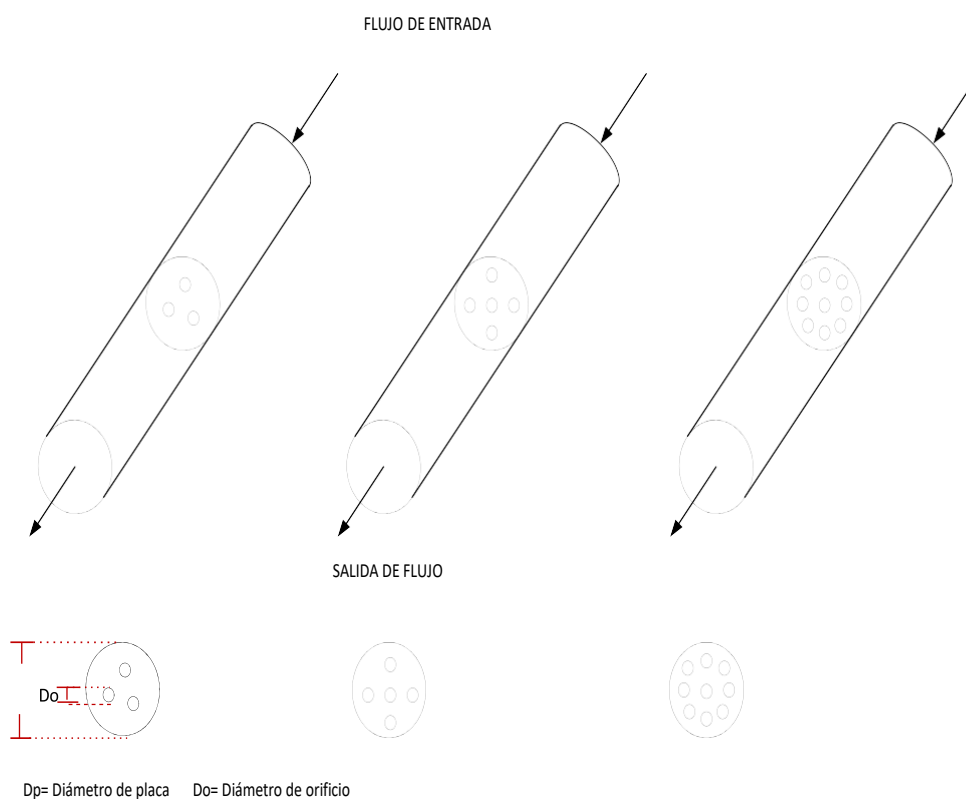
Existen varios dispositivos para producir estrangulamiento en la línea de conducción como la placa de orificio tubo Venturi, rotor de alta velocidad y homogeneizador de alta presión[26].

### ***Reactores de platos perforados***

El modelo de platos perforados el flujo en la línea principal, atraviesa una constricción que puede estar formada por un solo orificio o un conjunto de estos alojados en un plato perforado. Los parámetros de diseño a considerar en este tipo de reactor son: el perímetro total de los orificios presentes en la placa y el área de sección transversal de la placa. El área de flujo puede ser variable dependiendo de la geometría de la placa con múltiples orificios como se muestra en la figura 5[26].

**Figura 5**

*Configuración del cavitador basado en múltiples orificios*



Nota: tomada de[26].

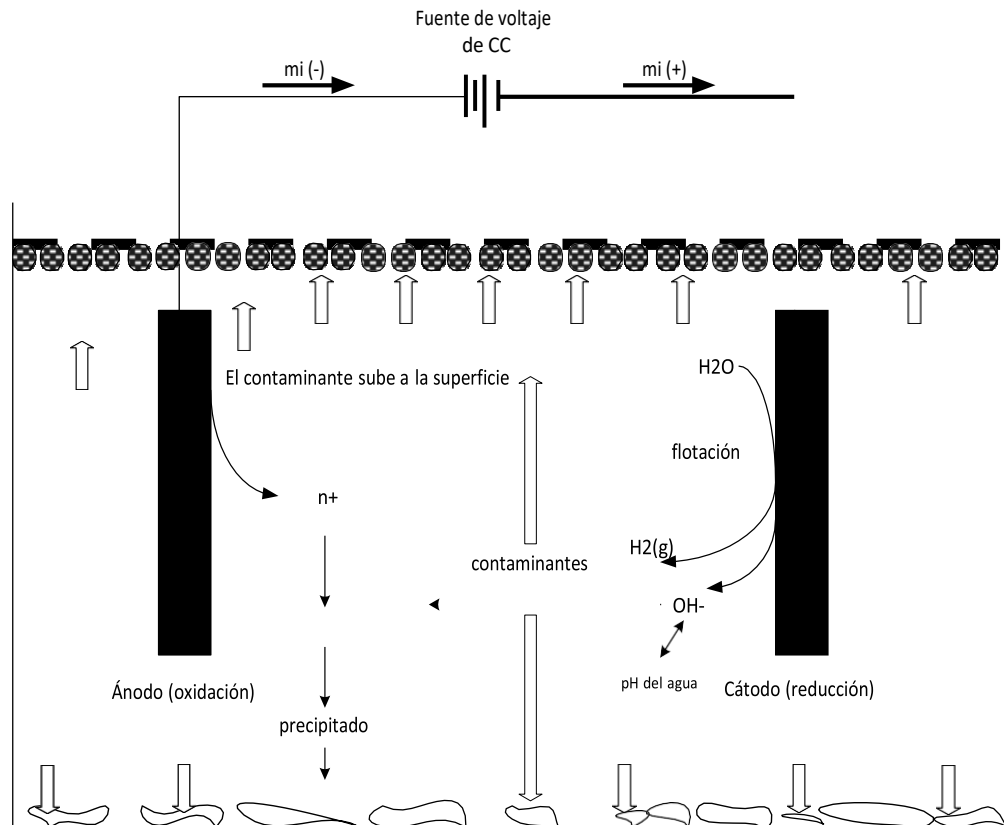
**La Electrocoagulación.** Es un proceso en el cual se desestabilizan las partículas contaminantes suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo los más utilizados el hierro y el aluminio.

La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz provocando una serie de reacciones químicas, resultando la estabilidad de las moléculas contaminantes, este estado estable produce partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas o solubles, cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario. Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido y tienden a formar óxidos metálicos que atraen

eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados como se muestra en la Figura 6 [28].

**Figura 6**

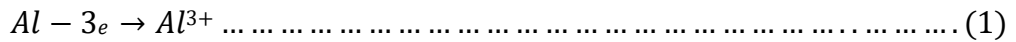
*Grafica de electrocoagulación de celda electrolítica*



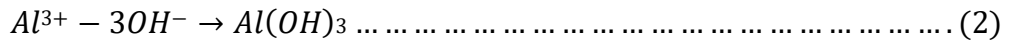
Nota: tomada de [29].

Existen investigaciones donde se comprueba que los iones  $Al^{3+}$  o  $Fe^{2+}$  son coagulantes muy eficientes para la floculación de partículas. Los iones de aluminio hidrolizado pueden formar largas cadenas de  $Al-O-Al-OH$  y pueden adsorber químicamente una amplia cantidad de contaminantes, Shen y col. (2003) dieron a conocer que el aluminio es normalmente usado para el tratamiento de agua potable y el hierro para el tratamiento de aguas residuales. En el caso del hierro, el  $Fe(OH)_3$  forma un coloide café rojizo y dependiendo del pH y de la disponibilidad de iones ferrosos, puede reaccionar con el oxígeno disuelto para dar  $Fe_3O_4$ . Las reacciones químicas que se llevan a cabo en el ánodo son las siguientes:

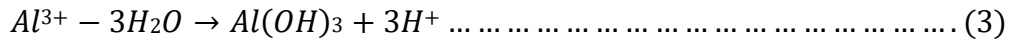
Para ánodo de aluminio:



En condiciones alcalinas:



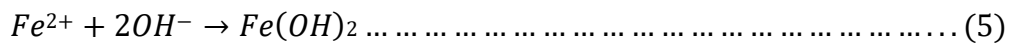
En condiciones ácidas:



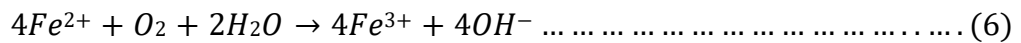
Para ánodo de Hierro:



En condiciones alcalinas:



En condiciones acidas:



La electrolisis del agua produce oxígeno e hidrógeno de la siguiente forma:

En el ánodo:



En el cátodo:



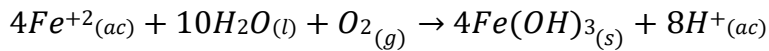
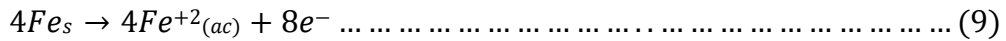
[30]

El proceso de electrocoagulación presenta tres etapas continuas a partir de las reacciones electrolíticas generadas por el paso de energía eléctrica en el sistema: la formación de coagulantes por oxidación electrolítica de los electrodos de sacrificio, la desestabilización de contaminantes que da lugar a la formación de flóculos y la separación de fases en el agua tratada por diferencia de densidades de los componentes.

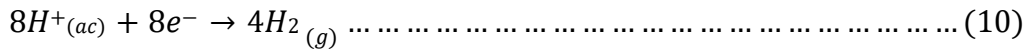
Se describen las reacciones químicas que tienen lugar durante el proceso de electrocoagulación, utilizando electrodos de hierro como ánodos de sacrificio, para lo cual se identifican dos posibles coagulantes formados dentro del reactor: hidróxido férrico (Fe(OH)<sub>3</sub>) e hidróxido ferroso (Fe(OH)<sub>2</sub>) a continuación:

(1) Formación del Hidróxido Férrico:

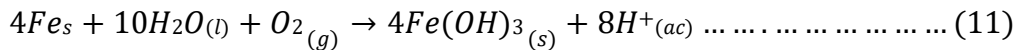
En el ánodo:



En el cátodo:

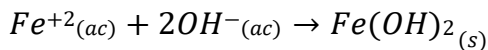


Globalmente:

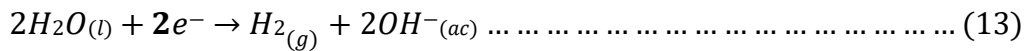


(2) Formación del Hidróxido Ferroso:

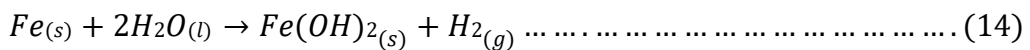
En el ánodo:



En el Cátodo:



Globalmente:



En las reacciones descritas, el hierro del ánodo se disuelve generando iones metálicos que se unen con iones hidróxido, generados por la hidrólisis del agua y reacciones electrolíticas del cátodo, formando hidróxidos casi inmediatamente. En el proceso de EC la reacción anódica implica la disolución del metal y la reacción catódica la formación de gas de hidrogeno e iones hidróxido. Los complejos de iones de hierro eliminan los contaminantes mediante adsorción, coprecipitación y atracción electrostática[31].

### **Ventajas de la electrocoagulación**

- Las burbujas producidas durante la electrocoagulación tienen mayor estabilidad que las generadas en los tratamientos de efluentes con

flotación de aire comprimido y de flujo de aire disuelto, por lo que conservan su gran superficie de contacto y por tanto, aumenta la eficiencia de remoción.

- Permite la reducción de una amplia variedad de contaminantes, como: metales pesados, grasa y aceites, materia orgánica, fosfatos y cianuros.
- Sus costos de operación son relativamente bajos si se realiza un apropiado diseño del reactor, selección de los materiales para electrodos, y una optimización de los parámetros de funcionamiento. Este proceso requiere poca corriente eléctrica y bajos costos de mantenimiento.
- Los equipos para electrocoagulación son compactos y fáciles de instalar, factores que son muy apreciables cuando no se dispone de espacio suficiente.
- Este proceso es sencillo de automatizar debido a que el control de dosificación se realiza mediante el ajuste de corriente. [32]

## **2.3 Marco Conceptual**

### **2.3.1 Tartrazina**

La tartrazina es un colorante sintético, conocida como amarillo 5 mono azoico y es un derivado del petróleo cuyo nombre químico es: 5-hidroxí-1-(4-sulfonatofenil) -4-4 (4-sulfonatofenilazo)-4-pirozol-3-carboxilato trisódico[9], es inoloro, higroscópico, soluble en agua y poco soluble en etanol[4]. es muy estable a pH ácidos y básicos, a temperaturas extremas, es hidrosoluble y ofrece un color amarillo a los alimentos como sopas, fideos, galletas, chizitos, gelatinas, helados, dulces, caramelos, jugos, condimentos, fármacos y alimentos para mascotas. La mayor absorbancia de la tartrazina se obtiene en longitudes de onda entre 425 a 427 nm, es el más utilizado por que es fácilmente combinable con otros colorantes[9].

### 2.3.2 Cinética de reacción de degradación de la tartrazina

La solución sintética conteniendo el colorante tartrazina E - 102 a concentraciones 2 y 8 ppm, en el intervalo de tiempo de 0 minutos hasta las 90min, para cada proceso de forma individual y en el proceso integrado, de diseño y elaboración propia.

Se tomaron muestras de 10mL en los intervalos de tiempo de 30min durante un proceso cíclico de 90min para cada experimento. Posteriormente se midió la absorbancia en el espectrofotómetro UV-VIS. La concentración del colorante se obtiene de la curva de calibración del colorante tartrazina E – 102, obteniéndose la dispersión de la degradación del colorante y el  $\ln(C_0/C)$  en función del tiempo de reacción del colorante tartrazina.

La cinética del proceso es la de Langmuir-Hinshelwood (L-H) que permite determinar la constante cinética de velocidad  $k$ , así como también la constante de equilibrio de adsorción  $K$  del colorante. asumiendo primer orden, nos permite determinar la constante cinética de velocidad  $k$ .

$$-r_A = -\frac{\partial C_A}{\partial t} = -kC_A$$

$K$ : Constante de velocidad de reacción (1/s)

$C_{AO}$ : Concentración inicial

$C_A$ : Concentración en el tiempo  $t$ .

Integrando se obtiene la siguiente ecuación

$$\ln\left(\frac{C_{AO}}{C_A}\right) = kt$$

El porcentaje de degradación del colorante, se obtuvo usando la ecuación:

$$\% \text{ Degradacion} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \cdot 100$$

$C_0$ : Concentración inicial.



$C_t$ : Concentración en el tiempo  $t$ .

### 2.3.3 Parámetros que afectan el Proceso

Los factores que se relacionan a continuación son aquellos que intervienen sobre el proceso de electrocoagulación que tienen una mayor influencia y una relación directamente proporcional con la efectividad de dicho proceso.

***PH.*** Es un factor que influye sobre la eficiencia de la corriente del proceso de solubilidad del metal para formar hidróxidos metálicos según Arango, a (2012). Se ha determinado, gracias a diferentes investigaciones, que el pH varía durante el proceso por el material de los electrodos y el pH inicial del agua residual; la eficiencia de remoción de un contaminante está determinada en un rango de pH específicos pero los mejores resultados se encuentran a valores cercanos a 7. Según la naturaleza del agua residual y los contaminantes que tenga presentes, el rango de pH puede variar. Para algunas investigaciones, se ha evidenciado que el pH aumenta para aguas residuales ácidas (por la generación de hidrógeno molecular originado en el cátodo) y disminuye para aguas residuales alcalinas. Es decir, la mejor eficiencia de remoción será a pH básico o ácido conforme al agua residual que se vaya a tratar[33].

***Densidad de Corriente.*** Es la corriente por área de electrodo, que determina la cantidad de iones metálicos generados por los electrodos por lo cual la disociación de iones metálicos es directamente proporcional a la densidad de corriente aplicada (Moussa et al.,2017). El porcentaje de remoción de un contaminante depende de la corriente eléctrica aplicada al medio acuoso, es decir, las variables eléctricas son los parámetros que más influyen en la remoción de un contaminante presente en el agua a tratar; un aumento en la densidad de corriente incrementa la eficiencia de remoción y consumo energético, pero, una densidad de corriente muy grande afecta significativamente la eficiencia[33].

Asimismo, para que el sistema de electrocoagulación funcione por periodos largos de tiempo sin mantenimiento Chen (2004) sugirió una densidad de corriente entre 20 a 25 A/m<sup>2</sup>, sin embargo, siempre es

preferible que se disponga de medidas de limpieza periódica de los electrodos. La fuente de corriente eléctrica al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones, bien sea de aluminio ( $Al^{+3}$ ) o de hierro ( $Fe^{+2}$ ), liberados por los electrodos. La energía eléctrica suministrada a la celda electroquímica puede ser por corriente alterna (CA) o corriente directa (CD) dependiendo de la respuesta electroquímica entre el agua y las placas y finalmente, para la selección de la densidad de corriente se deben tener en cuenta también los parámetros de pH, temperatura y caudal para garantizar una alta eficiencia del proceso[33].

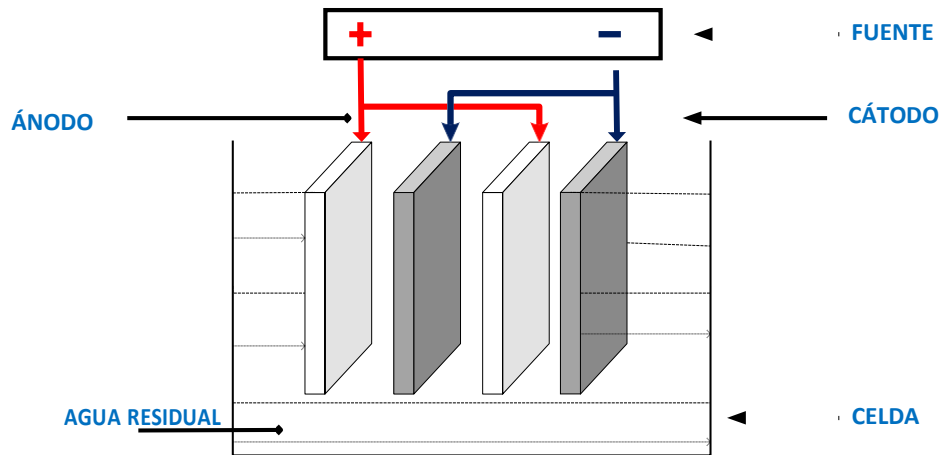
**Tipo de Electrodo y Arreglo:** Los electrodos son los encargados de producir los iones que son fundamentales para el proceso de electrocoagulación, la eficiencia del proceso depende del material del electrodo (Mahecha et al., 2018). Algunos estudios evidencian el aumento de la electrocoagulación con el empleo de electrodos de aluminio comparado con los electrodos de acero, esto se debe a la formación de complejos dispersados de hidróxido de aluminio por la hidrólisis del ion aluminio (Mollah et al., 2004). En el arreglo de una celda en serie, es necesario una diferencia de potencial más alta para la corriente que se esté tratando debido al flujo, ya que las celdas que están dispuestas en serie tienen una resistencia más alta que en un arreglo de una celda en paralelo, la corriente eléctrica se divide entre todos los electrodos en lo referente a la resistencia de las celdas individuales[33].

Demirci et al., (2015) evaluaron el efecto de diferentes disposiciones de los electrodos (monopolar-paralelo, monopolar-serie y bipolar-serie) en la remoción de color y turbidez en el tratamiento de aguas residuales textiles, demostrando que la eficiencia de remoción fue similar para las tres disposiciones sin embargo la disposición monopolar-paralelo es la más rentable en costo operativo.

En las Figuras 7 y 8 se muestran las diferentes disposiciones de los electrodos para la remoción eficiente.

**Figura 7**

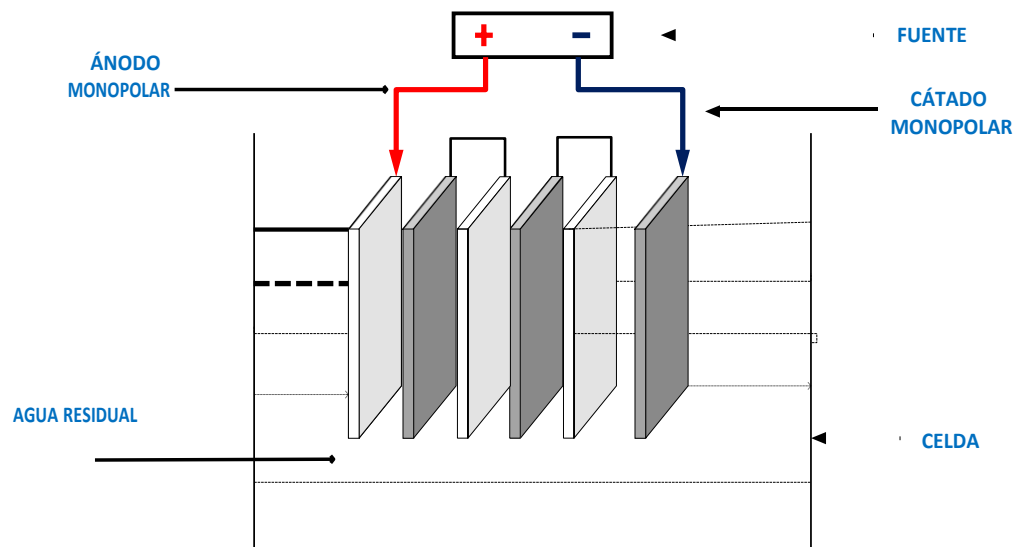
*Arreglo monopolar conectado en paralelo*



Nota: tomada de [34].

**Figura 8**

*Arreglo monopolar conectado en serie*



Nota: tomada de [34].

**Distancia entre Electrodo.** Toma un papel muy importante en la electrocoagulación como campo electrostático depende de la distancia entre el ánodo y el cátodo. La máxima eficacia de eliminación de contaminantes se obtiene manteniendo una distancia óptima entre los

electrodos. A la distancia mínima entre electrodos, la eficiencia de eliminación de contaminantes es baja. Esto se debe al hecho de que los hidróxidos metálicos generados que actúan como flóculos y eliminan el contaminante por sedimentación se degradan por colisión entre sí debido a la alta atracción electrostática. La eficiencia de eliminación de contaminantes aumenta con un aumento en la distancia entre electrodos desde la distancia mínima hasta la distancia óptima. Esto se debe al hecho de que, al aumentar aún más la distancia entre los electrodos, hay una disminución en los efectos electrostáticos resultando en un movimiento más lento de los iones generados. Proporciona más tiempo para que el hidróxido metálico generado se aglomere y forme los flóculos, lo que aumenta la eficiencia de eliminación del contaminante en la solución[33].

**Conductividad.** Arango Ruiz (2012), establece que el suministro de electrolitos como el cloruro de sodio (NaCl) o el cloruro de calcio (CaCl<sub>2</sub>) se emplea para incrementar la conductividad de las aguas residuales, asimismo, los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de otros iones (carbonatados o sulfatados) que generan una capa insoluble que se deposita sobre los electrodos, aumentando el potencial entre los electrodos y disminuyendo la eficiencia de la corriente. A mayor conductividad eléctrica, mayor densidad de corriente siempre y cuando se mantenga constante el voltaje de alimentación a la celda de electrocoagulación, pero, un incremento de la conductividad, que mantiene constante la densidad de corriente, produce una disminución del voltaje suministrado[28].

## 2.4 Definición de Términos Básicos

- **Colorante:** Son compuestos químicos xenobióticos, no se encuentran de forma natural en la biosfera. Tiene un valor estético en los productos textiles, alimenticios, farmacéuticos y cosméticos, fundamental porque proporciona la apariencia física más apropiada[35].
- **Colorante Alimentario:** Considerado como uno de los aditivos sintético que tiene como objetivo la modificación de las preferencias del consumidor, ya que el color es uno de los principales atributos para la

elección de un alimento. siendo realmente un aditivo inútil o engañoso[35].

- **Tartrazina:** Es un colorante artificial, también conocida como Amarillo 23 (AYA 23) o Aditivo E-102. Pertenece a la familia de los colorantes azoicos, contienen el grupo azo:  $-N=N-$ . Se obtiene en forma de polvo y es soluble en agua, da tonos amarillos-anaranjados es ampliamente utilizado desde 1916[35].
- **Tratamiento de Aguas Residuales:** Es el uso de diversas técnicas o procedimientos físicos y químicos que se utilizan para la eliminación de contaminantes, agentes tóxicos en el agua residual provenientes de diferentes fuentes[35].
- **La cavitación hidrodinámica:** Basa su principio en la formación y colapso de microburbujas o cavidades dentro de un líquido por efecto de la presión. Las cavidades implosionan bajo ciertas condiciones, lo que resulta en un cambio de presión y temperatura generando turbulencias y radicales hidroxilos capaces de mineralizar los contaminantes orgánicos.
- **Numero de cavitación:** Es un numero adimensional que expresa la relación entre la diferencia de la presión local absoluta del fluido con respecto a su presión de vapor y la energía cinética por volumen del flujo.
- **Implosión:** Es una acción de romperse hacia dentro con estruendo las paredes una cavidad en cuyo interior existe una presión inferior a la exterior, es lo contrario a una explosión. Este fenómeno ocurre a la salida de la placa de orificio.
- **Electrocoagulación:** Consiste en un proceso de desestabilización de los contaminantes del agua ya estén en suspensión, emulsionados o disueltos, mediante la acción de corriente eléctrica directa de bajo voltaje y por la acción de electrodos metálicos de sacrificio, normalmente aluminio/hierro.
- **Ánodo:** Electrodo en el que tiene lugar la oxidación.
- **Anión:** Ion con carga negativa.

- **Amperio:** Unidad de intensidad de corriente eléctrica. Un amperio es una corriente constante que, manteniéndose en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y situados a una distancia de un metro uno de otro en el vacío, producirá una fuerza igual a  $2 \times 10^{-7}$  newton por metro de longitud.
- **Electrón:** Partícula con carga negativa muy ligera que existen en la región alrededor del núcleo cargado positivamente de un átomo.
- **Cátodo:** electrodo en el que ocurre la reducción.
- **Catión:** Ion con carga positiva.
- **Proceso Integrado:** Consiste en la sinergia de dos técnicas, ya sean físicas, químicas o biológicas para obtener un objetivo previamente identificado de forma más eficiente.
- **Degradación:** Disminución o eliminación progresiva de una sustancia química en un medio acuoso, dejando sustancias más fácilmente biodegradables.
- **Parámetros:** Los factores que se relacionan a continuación son aquellos que intervienen sobre los procesos, tienen una mayor influencia y una relación directamente proporcional con la efectividad.
- **Contaminantes Emergentes:** se definen como contaminantes previamente desconocidos o no reconocidos, no regulados por la legislación y cuyo efecto sanitarios y ambientales aun no son suficientemente conocidos. Entre ellos se encuentra esteroides, hormonas, surfactantes, colorantes, conservantes, etc [35].

### III. HIPOTESIS Y VARIABLES

#### 3.1 Hipótesis (general y específicas)

##### General

Se logrará alcanzar la degradación del colorante tartrazina (E-102) entre 70 - 95% mediante el proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación.

##### Específicas

1. Al seleccionar en forma adecuada los parámetros de operación como (presión de entrada al dispositivo de cavitación, concentración inicial de tartrazina) del proceso de cavitación hidrodinámica se logrará una remoción del colorante entre 10% al 30%.
2. Al seleccionar en forma adecuada los parámetros de operación como (potencial eléctrico, concentración inicial de tartrazina, concentración de NaCl) del proceso de electrocoagulación se logrará una remoción del colorante entre 60% al 65%.

##### Variable Dependiente

$Y = F(x) = \% \text{ Degradación del colorante (E -102) tartrazina mediante el proceso integrado}$

##### Variables Independientes

$X_1 = \text{Parámetros del proceso de Cavitación Hidrodinámica}$

$X_{1.1} = \text{Presión}$

$X_{1.2} = \text{Concentración inicial de colorante tartrazina}$

$X_2 = \text{Parámetros del Proceso de Electrocoagulación}$

$X_{2.1} = \text{Voltaje o potencial eléctrico}$

$X_{2.2} = \text{Concentración de colorante tartrazina}$

$X_{2.3} = \text{NaCl}$

##### Condiciones constantes:

Tiempo : 90 minutos

Nº de Placa de Orificios : 20 orificios

Volumen de la muestra : 3.6 L

Distancia entre electrodos: 2.0 cm



### 3.1.1 Operacionalización de variables

**Tabla 5**

**Tabla de operacionalización de variables**

<b>Variables dependientes</b>	<b>D. Conceptual</b>	<b>D. Operacional</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Método</b>	<b>Técnica</b>
Y= Degradación del colorante tartrazina	Disminución o eliminación progresiva de una sustancia química en un medio acuoso[21].	Porcentaje de reducción del colorante en la solución sintética de tartrazina.	Degradación Concentración	% porcentaje Tartrazina ppm	Cálculo matemático Instrumental	$\frac{Ci - Cf}{Ci} \times 100$ Espectrofotometría
<b>Variables independientes</b>	<b>D. Conceptual</b>	<b>D. Operacional</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Método</b>	<b>Técnica</b>
X <sub>1</sub> = Parámetros de la Cavitación Hidrodinámica.	Factores que se relacionan e intervienen sobre el proceso de cavitación hidrodinámica que tienen una mayor influencia y una relación directamente proporcional con la efectividad de dicho proceso[13]	Factores de Presión y concentración de tartrazina del proceso de cavitación hidrodinámica	Presión	35 Psi 50 Psi 70 Psi	Presión manométrica (Instrumental)	Manometría
			Concentración de tartrazina	2 PPM 8 PPM	Observacional	Medición directa
X <sub>2</sub> = Parámetros de la Electrocoagulación	Factores que se relacionan e intervienen sobre el proceso de electrocoagulación que tienen una mayor influencia y una relación directamente proporcional con la efectividad de dicho proceso[14]	Factores de potencial eléctrico, concentración de tartrazina y NaCl en el proceso de electrocoagulación	Potencial Eléctrico	7.7 V 9.2 V 11.2 V	Electrometría	Basado en energía
			Concentración de tartrazina	2 PPM 8 PPM	Observacional	Medición directa
			Concentración de NaCl	0.25 gr/L 0	Análisis volumétrico	Titulación

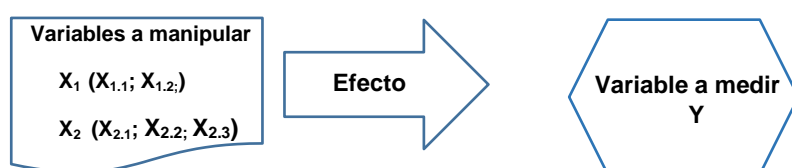
## IV. METODOLOGIA DEL PROYECTO

### 4.1 Diseño Metodológico

La presente investigación se clasificó según su naturaleza como tecnológica, porque se desarrolló un proceso nuevo de integración para el tratamiento de una solución sintética con contenido del colorante tartrazina, utilizada en la industria de alimentos y otros, dejando en sus efluentes con cierto porcentaje de contenido de colorante remanente. Por su finalidad de tipo aplicativo exploratorio, por ser un proceso nuevo integrado, además obtuvo los parámetros para la viabilidad del proceso. Por el análisis interpretativo de las variables se consideró cuantitativo por la medición del porcentaje de degradación del colorante tartrazina. Asimismo, transversal porque recolectó los datos en un solo momento, en un tiempo único. Por el diseño interpretativo de la investigación: experimental, deductivo, correlacional de causa – efecto, se estimaron cuatro etapas en el diseño de la presente investigación.

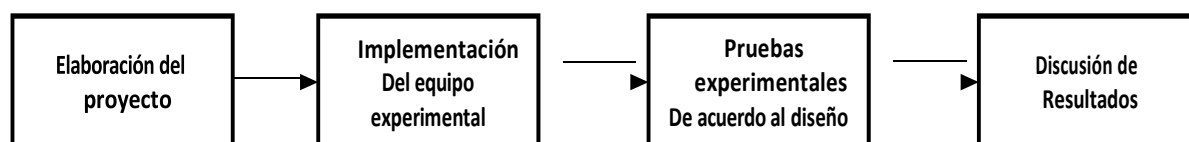
**Figura 9**

*Diseño de la Investigación*



### 4.2 Método de la Investigación

La presente investigación se realizó aplicando el método científico, consistente en la percepción directa del objeto de la investigación. El desarrollo de la tesis consistió en las siguientes etapas.



#### Primera Etapa

Se realizó la revisión a través de lectura bibliográfica para recopilar datos de diferentes textos, fuentes, autores y otros elementos necesarios para la investigación, los

resúmenes para sintetizar textos y documentos para la recopilación de la información de todas las fuentes a consultar.

### **Segunda Etapa**

El módulo experimental consistió en un proceso integrado que empieza de un tanque de alimentación de 3,6 litros de capacidad (A) que contiene la solución sintética de colorante tartrazina, dicho tanque está conectado a una bomba (B) la cual se encuentra debajo de esta, transportando la solución hacia el dispositivo de cavitación hidrodinámica a través de una tubería de agua caliente de  $\frac{1}{2}$  pulgadas de diámetro. Antes y después del dispositivo de cavitación se encuentra dos (02) manómetros (C) que miden la diferencia de presión, además se cuenta con una conexión directa de la bomba al tanque de alimentación que actúa como alivio de presión, el cual consta de una válvula de paso que sirve para controlar el caudal en el dispositivo de cavitación. El dispositivo de cavitación hidrodinámica es un diseño nuevo y está acondicionado con una placa metálica de veinte (20) orificios (D), dentro de un accesorio de unión universal, que permite la fácil manipulación, limpieza y cambio de placa.

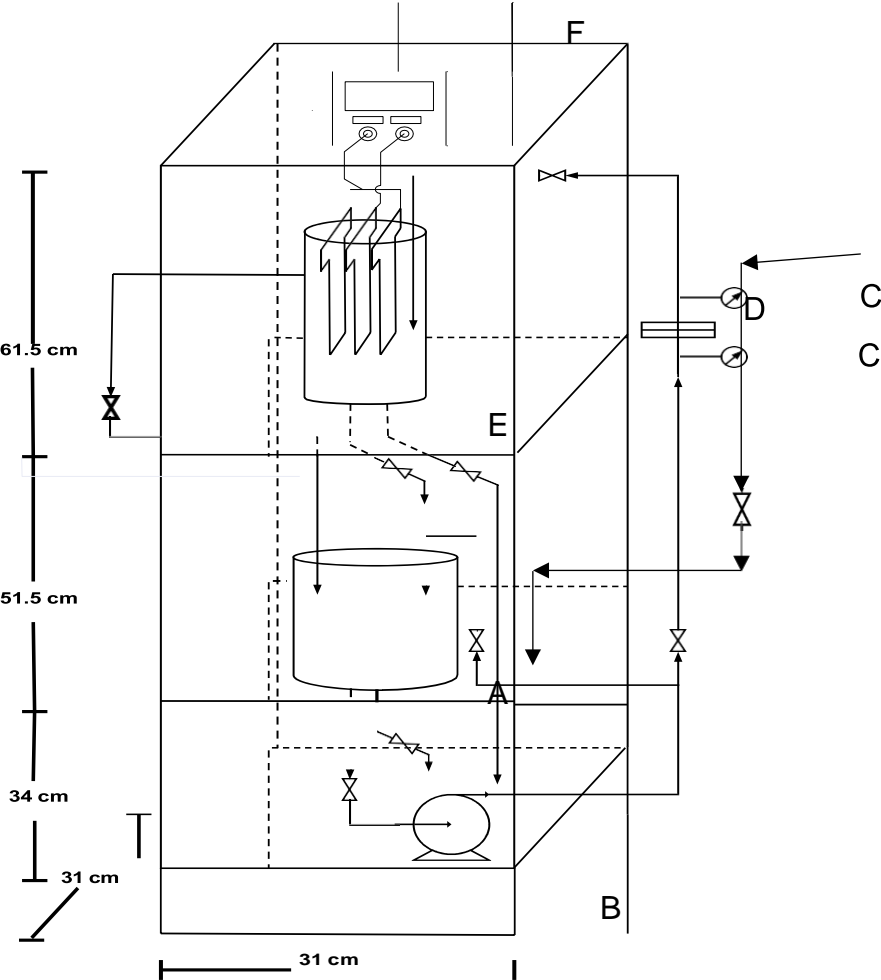
Después del proceso de cavitación hidrodinámica la solución es transportado al tanque de electrocoagulación (E) a través de una tubería de  $\frac{1}{2}$  pulgadas de diámetro, con una válvula de paso que sirve para controlar la presión en el proceso de electrocoagulación, ubicada antes del ingreso al tanque.

El dispositivo de electrocoagulación está diseñado en un tanque acrílico con tres (03) electrodos de Aluminio (Al), siendo un ánodo y dos cátodos, ubicados a 2.0cm de distancia, conectados a una fuente de alimentación (F), donde se manipularon los potenciales eléctricos. En la parte inferior del tanque de electrocoagulación presenta una válvula de paso para muestrear la solución sintética de tartrazina, en los diferentes tiempos, para su análisis en el equipo espectrofotómetro UV. Además, presenta un sistema de recirculación, mediante una sección de tubería, ubicada en la parte media del equipo, conectada al tanque de alimentación para controlar el nivel de la solución en el tanque de tartrazina.

la muestra de solución se recirculo durante 90 min para cada experimento, y se analizó la absorbancia de la solución sintética final. De acuerdo al prototipo experimental propuesto mostrado en la figura 10, que corresponde a la gráfica del proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación.

Asimismo, se optó por realizar experimentos individualizados para cada proceso, para obtener los parámetros adecuados y realizar el proceso integrado con las condiciones establecidas. Para el proceso de electrocoagulación se realizaron doce (12) experimentos, para el proceso de cavitación hidrodinámica se realizaron seis (06) experimentos y para el proceso integrado se llevó a cabo un experimento. Se trabajó un total de diecinueve (19) experimentos y setenta y seis (76) muestras tomadas de los procesos individualizados e integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación.

**Figura 10**  
*Grafica del equipo experimental del proceso integrado*



### Tercera Etapa

Las pruebas experimentales se efectuaron mediante el diseño factorial para cada proceso individualizado, proporcionando los parámetros de una forma simple, eficiente y sistemática, de esa forma aporta información de los factores que afectan el proceso y los niveles en que debe variar, dando un mejor resultado.

En la tabla N° 6, muestra los dos (02) factores y niveles para cada uno de los experimentos propuestos para el proceso de Cavitación Hidrodinámica.

**Tabla 6**

***Factores y niveles de cavitación hidrodinámica propuestos***

Factor	Unidad	Niveles		
Presión de alimentación	Psi	35	50	70
Concentración inicial de colorante de tartrazina	ppm	2	8	

En total se realizaron seis (06) experimentos a distintas presiones de alimentación (35Psi, 50Psi y 70Psi), concentración de tartrazina (2 ppm y 8 ppm), se tomaron muestras cada 30 minutos durante 1 hora y media.

La matriz de investigación del proceso de cavitación hidrodinámica se detalla en la Tabla 7 que explica el diseño factorial.

**Tabla 7**

***Matriz de experimentación del proceso de cavitación hidrodinámica***

N° Pruebas experimentales	Tipo Pt	Bloques	Presión de alimentación	Concentración inicial de tartrazina
1	1	1	35	2
2	1	1	35	8
3	1	1	50	2
4	1	1	50	8
5	1	1	70	2
6	1	1	70	8

En la tabla 8 se muestra el diseño experimental que se realizó en seis (06) experimentos (2 factores, 3 niveles para la presión de alimentación y 2 niveles para la concentración inicial de colorante tartrazina).

**Tabla 8**

***Diseño experimental del proceso de cavitación hidrodinámica***

N° Experimentos	Tiempo (min)	Presión de alimentación (Psi)	Concentración de tartrazina (ppm)	% Reducción del colorante tartrazina
1	90	35	2	Y
2	90	35	8	Y
3	90	50	2	Y
4	90	50	8	Y
5	90	70	2	Y
6	90	70	8	Y

En la tabla N° 9, se muestra los factores y niveles de experimentación para cada variable del proceso de electrocoagulación.

**Tabla 9**

***Factores y niveles del proceso de electrocoagulación propuestos***

Factor	Unidad	Niveles		
Potencial eléctrico	V	7.7	9.2	11.2
Concentración inicial de colorante de tartrazina	ppm	2	8	
Cantidad de NaCl	g/L	0.25	0	

En total se realizaron Doce (12) experimentos a distinto potencial eléctrico (7.7V, 9.2V, y 11.2V), concentración de tartrazina (2ppm y 8ppm) y cantidad de NaCl (0.25 g/L), tomando tres muestras cada 30 minutos durante 90 minutos. La matriz de investigación del proceso de electrocoagulación se detalla en la Tabla 10 que explica el diseño factorial.

**Tabla 10****Matriz de experimentación del proceso de electrocoagulación**

N° pruebas experimentales	Tipo Pt	Bloques	Potencial Eléctrico	Concentración inicial de tartrazina	Cantidad de NaCl
1	1	1	7.7	2	0.25
2	1	1	7.7	2	0
3	1	1	7.7	8	0.25
4	1	1	7.7	8	0
5	1	1	9.2	2	0.25
6	1	1	9.2	2	0
7	1	1	9.2	8	0.25
8	1	1	9.2	8	0
9	1	1	11.2	2	0.25
10	1	1	11.2	2	0
11	1	1	11.2	8	0.25
12	1	1	11.2	8	0

En la tabla 11 se muestra el diseño experimental que se realizó en doce (12) experimentos (3 factores, 3 niveles para potencial eléctrico, 2 niveles para la concentración inicial de colorante tartrazina y 2 niveles para cantidad de NaCl).

**Tabla 11****Diseño experimental del proceso de electrocoagulación**

N° Experimentos	Tiempo (min)	Potencial Eléctrico (V)	Concentración de tartrazina (ppm)	Cantidad de NaCl (g/L)	% Reducción del colorante tartrazina
1	90	7.7	2	0.25	Y
2	90	7.7	2	0	Y
3	90	7.7	8	0.25	Y
4	90	7.7	8	0	Y
5	90	9.2	2	0.25	Y
6	90	9.2	2	0	Y
7	90	9.2	8	0.25	Y
8	90	9.2	8	0	Y
9	90	11.2	2	0.25	Y
10	90	11.2	2	0	Y
11	90	11.2	8	0.25	Y
12	90	11.2	8	0	Y

**Cuarta Etapa**

Se determinaron los parámetros adecuados de cada proceso, y con la información obtenida se realizó la integración de ambos procesos. Se efectuó un (01) experimento con los parámetros obtenidos, como son: potencial eléctrico; presión de alimentación; concentración de tartrazina; cantidad de NaCl, las muestras se tomaron cada 30 minutos.

En la tabla 12 se muestra el diseño experimental del proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación durante un tiempo total de 90 min.



**Tabla 12**

**Diseño experimental del proceso integrado con los parámetros**

Tiempo (min)	Potencial Eléctrico (V)	Presión de alimentación (Psi)	Concentración de tartrazina (ppm)	Cantidad de NaCl (g/L)	% Reducción del colorante tartrazina
0	V	P	Z	NaCl	Y1
30	V	P	Z	NaCl	Y2
60	V	P	Z	NaCl	Y3
90	V	P	Z	NaCl	Y4

#### 4.3 Población y Muestra

**La Población** No aplica, por ser el caso de experimentación a nivel laboratorio, estuvo en función a la operatividad del equipo experimental.

**La Muestra** una solución sintética conteniendo colorante tartrazina, en un volumen de 1.8 litros para los procesos de forma individual y 3.6 litros para el proceso integrado.

#### 4.4 Lugar de estudio

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el Área de Laboratorio de Investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao.

#### 4.5 Técnicas e Instrumentos para la Recolección de la Información

La técnica utilizada es el análisis volumétrico, armado y montaje del equipo de experimentación y los instrumentos que se utilizaron son: Espectrofotómetro de UV-Visibles, fuente de poder, voltímetro, cronometro, manómetros y termómetro y así evaluamos los datos mediante el método experimental que permite manipular las variables y observar los efectos favorables o adversos en cada proceso, comparando resultados y encontrando las condiciones óptimas.

#### 4.5.1 Equipos y materiales

##### Equipos

Los instrumentos de medición que se utilizaron fueron los siguientes: un espectrofotómetro para medir magnitudes físicas como la absorbancia atómica; una fuente de poder para el proceso de electrocoagulación de capacidad de 0 a 11.2 V y suministra hasta 30 amperios, un voltímetro para la medición de potenciales eléctricos; un cronómetro para las mediciones de tiempo, dos manómetros para la medición de la presión dichos resultados se utilizaron en el presente trabajo de investigación. Asimismo, se elaboró y diseño un equipo experimental del proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación para la investigación, tal como se muestra en la figura 11.

##### Figura 11

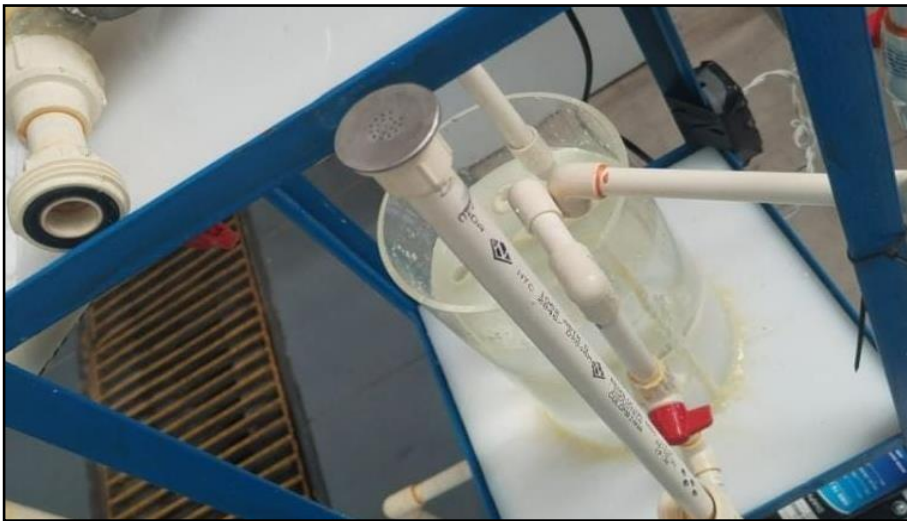
*Equipo experimental de proceso integrado*



Placa de orificios: Se utilizó una placa de 20 orificios, acondicionada a una unión universal para que contenga la placa de orificios, permitiendo una fácil manipulación en el cambio y limpieza para el proceso de cavitación hidrodinámica.

### **Figura 12**

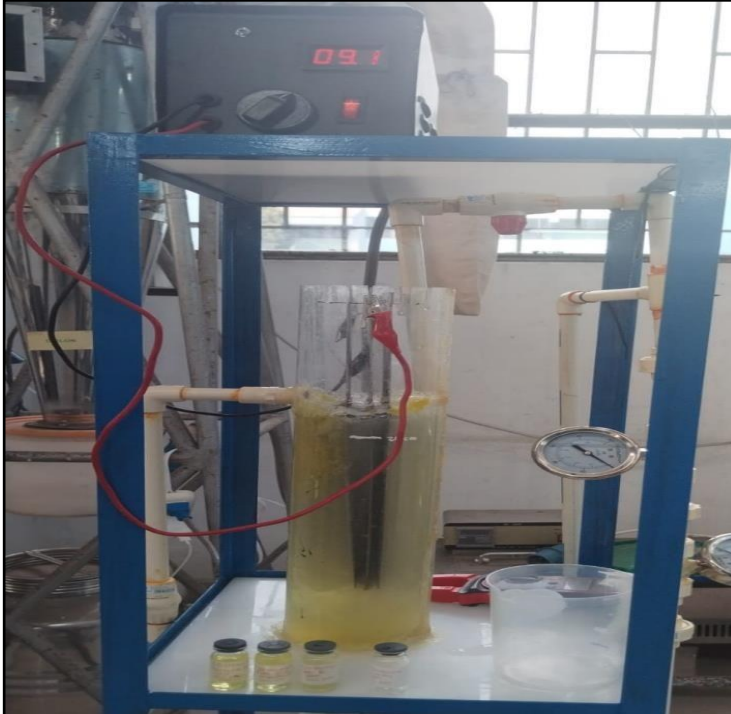
*Placa de orificios acondicionada a una unión universal para el proceso de cavitación hidrodinámica*



Electrodos: Se utilizó Tres (03) electrodos de material de aluminio, de forma rectangular, acondicionados al tanque del proceso de electrocoagulación, y conectados a una fuente de poder, permitiendo así una fácil manipulación en el cambio y limpieza.

**Figura 13**

*Tres electrodos acondicionados al tanque acrílico de electrocoagulación y conectado a una fuente de alimentación*



**Figura 14**

*Equipo de espectrofotómetro de rastreo SpectroQuest 2800 de UNICO*



### **Materiales**

- Tres (03) electrodos (ánodo y cátodo) de material de aluminio de dimensiones: 25.3 cm de largo, 8.0 cm de ancho y 1.0 cm de espesor, de

forma rectangular, dos (02) placas de aluminio como cátodo y una placa como ánodo (electrodo de sacrificio)

- Vasos de precipitación de 10 mL
- Viales de vidrio con tapón de jefe para la recepción de muestras
- Dos (02) baldes de plástico de 20 L
- Dos (02) baldes de plástico de 8 L
- Un (01) cilindro para almacenar el agua destilada.
- Una (01) refrigeradora para mantener las muestras
- Una (01) pizeta de 500 mL
- Un (01) termómetro de 100 °C

### **Reactivos**

El reactivo utilizado para el experimento fue el NaCl que genera un aumento en la conductividad de la solución sintética conteniendo tartrazina.

## **4.6 Análisis y Procesamiento de Datos**

El análisis de los resultados experimentales obtenidos se realizó mediante los softwares de Microsoft Excel y Minitab 18. Con la estadística descriptiva se generaron cuadros y gráficos estadísticos, medidas de tendencia central (media) y medidas de dispersión (desviación estándar). La estadística inferencial incluyó la prueba de normalidad, la prueba de homogeneidad de varianzas, además, las pruebas paramétricas de DOE factorial y T-Student para evaluar la relación de los parámetros medidos y su incidencia en la variable dependiente (degradación del colorante tartrazina). Determinando la viabilidad del proceso y dando resultados

### **Determinación de la longitud de onda del colorante**

Para realizar las pruebas de absorbancia se requiere conocer la longitud de onda a la cual se absorbe el colorante en el equipo instrumental UV-VIS Spectrophotometer, modelo UV-1600PC según se observa en la figura 13.

Para ello, se hizo un barrido de absorbancia para obtener la longitud de onda idónea para los análisis. Las muestras utilizadas fueron de concentraciones de 1, 2, 4, 6 y 8 ppm del colorante tartrazina E - 102. Los análisis de absorción se realizaron en el

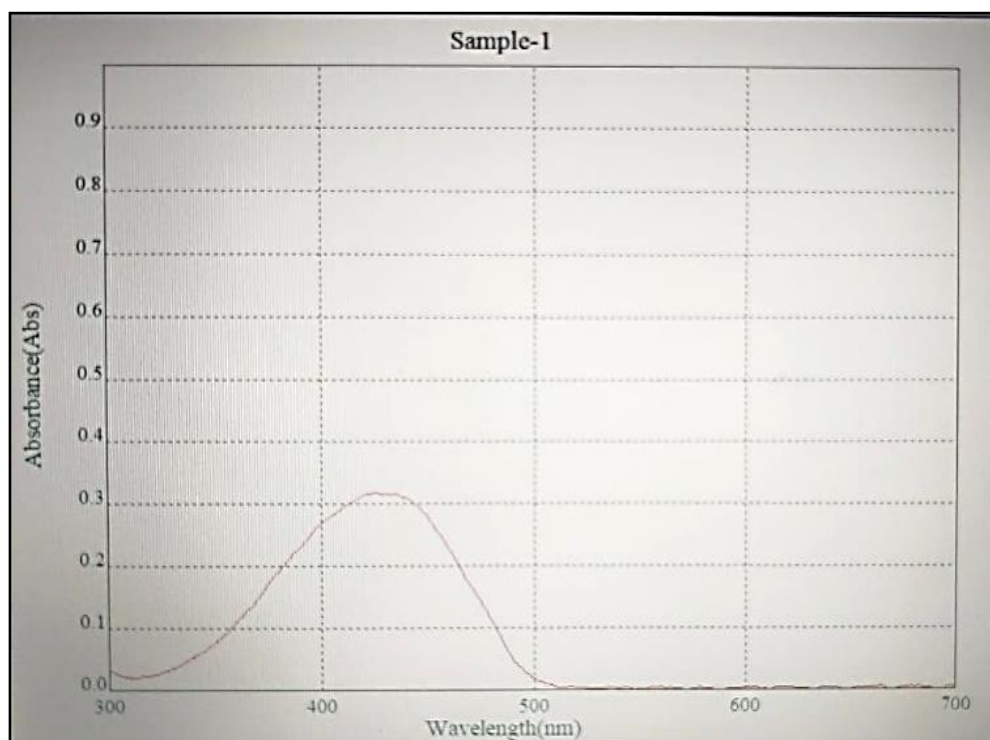
LOPU de la Facultad de Ingeniería Química de la UNAC. El procedimiento que se realizó:

- Se calibró el espectrofotómetro hasta que el set figure 0.000
- Se utilizó como blanco el agua destilada.
- Se realizó el barrido espectral en el rango visible (300 a 700 nm)

En la figura 15 se aprecia el espectro de absorbancia del colorante tartrazina emitido por el equipo analítico UV- VIS, de distintas concentraciones, observándose un valor máximo de 439 nm

### Figura 15

*Espectro de absorbancia del Colorante tartrazina E - 102*



En la figura 16 se observa dos (02) valdes con muestras preparadas a 2 ppm y a 8 ppm del colorante tartrazina, para el experimento.

## Figura 16

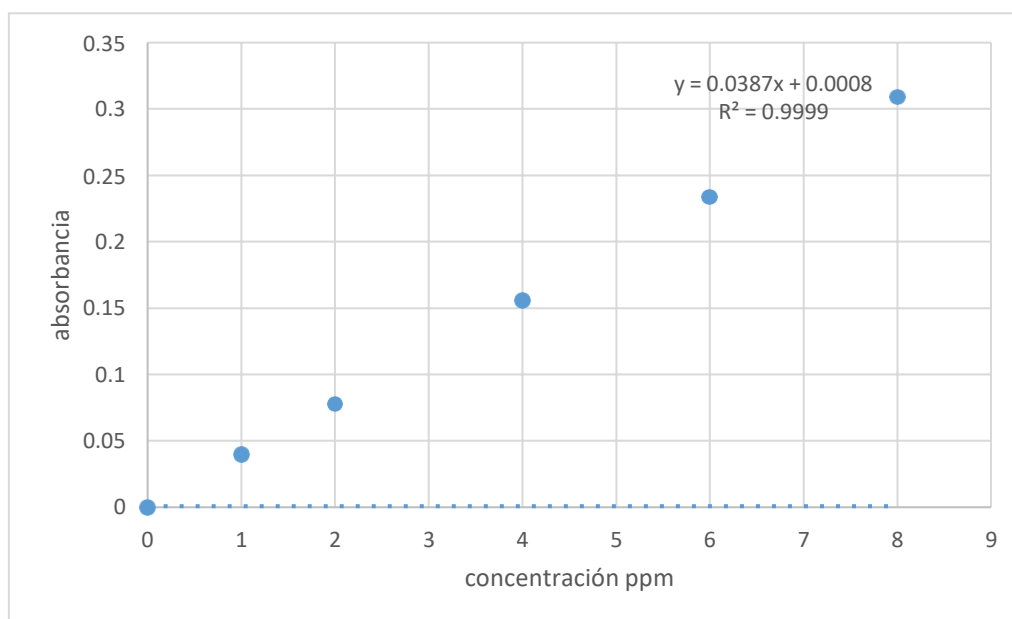
*Muestras de 2 ppm y 8 ppm de colorante tartrazina E -102.*



En la figura 17 se muestra la curva de calibración de absorbancia versus concentración del colorante tartrazina E - 102 en tiempo cero. Luego, mediante regresión lineal se obtiene la ecuación para el cálculo de las concentraciones a partir de mediciones de la absorbancia.

**Figura 17**

*Curva de calibración, absorbancia en función de la concentración de la tartrazina*



#### **4.7 Aspectos Éticos de Investigación**

En cumplimiento a la responsabilidad ética, como seres humanos cuando percibimos y somos conscientes del constante deterioro del recurso hídrico, y conocer esa realidad nos exige dar respuesta personal y colectiva, siendo la disminución de nuestra huella ecológica, el cual se materializa aportando una nueva tecnología en el tratamiento de aguas residuales que contengan colorantes sintéticos. En tal sentido como autores de esta tesis después de investigar diversas bibliografías, propone el uso de un proceso integrado de cavilación hidrodinámica y electrocoagulación, el cual brinda una alternativa de solución para la remoción del colorante sintético tartrazina en las aguas residuales industriales, que son causantes del gran daño a nuestro medio ambiente.



## V. RESULTADOS

### 5.1 Resultados descriptivos

#### 5.1.1 Resultados experimentales de los procesos de cavitación hidrodinámica

En la siguiente tabla 13 se presenta los resultados obtenidos en las seis (06) pruebas experimentales del proceso de cavitación hidrodinámica tomando muestras cada 30 min, según el diseño experimental.

**Tabla 13**

#### **Resultados de las pruebas experimentales de cavitación hidrodinámica**

Exp.	Tiempo (min)	Conc. (ppm)	Presión (Psi)	Abs.	Concentración Tartrazina ppm	Ln (Co/C)	% Reducción de Tartrazina	Cte. Velocidad de Reacción k
1	0	2	35	0.129	2.3146	0	0	0
	30		35	0.12	3.0818	0.0728	7.023	0.0024272
	60		35	0.12	3.0818	0.0728	7.023	0.0012136
	90		35	0.118	3.0301	0.0897	8.583	0.0009971
2	0	8	35	0.31	7.9961	0	0	0
	30		35	0.289	7.4529	0.0703	6.793	0.0023448
	60		35	0.287	7.4012	0.0773	7.439	0.0012885
	90		35	0.286	7.3753	0.0808	7.763	0.0008979
3	0	2	50	0.129	3.3146	0	0	0
	30		50	0.117	3.0042	0.0983	9.364	0.0032772
	60		50	0.113	2.9008	0.1333	12.485	0.0022227
	90		50	0.112	2.8749	0.1423	13.265	0.0015813
4	0	8	50	0.309	7.9702	0	0	0
	30		50	0.275	7.0908	0.1169	11.033	0.003897
	60		50	0.274	7.0649	0.1205	11.358	0.0020094
	90		50	0.272	7.0132	0.1279	12.007	0.0014213
5	0	2	70	0.128	3.2887	0	0	0
	30		70	0.121	3.1077	0.0566	5.505	0.0018875
	60		70	0.121	3.1077	0.0566	5.505	0.0009437
	90		70	0.12	3.0818	0.0649	6.292	0.000722
6	0	8	70	0.308	7.9443	0	0	0
	30		70	0.264	6.8063	0.1546	14.325	0.0051537
	60		70	0.263	6.7804	0.1584	14.651	0.0026403
	90		70	0.263	6.7804	0.1584	14.651	0.0017602

El porcentaje de reducción de tartrazina para cada experimento, siendo los experimentos Nro. 3 y 6, los más óptimos, con las condiciones de: 50 Psi de presión, a una concentración de 2 ppm del colorante y 70 Psi de presión, a una concentración de 8 ppm del colorante, respectivamente.

En la siguiente tabla 14 se presenta las condiciones iniciales y finales de las pruebas experimentales del proceso de cavitación hidrodinámica, según el diseño experimental

**Tabla 14**  
**Condiciones del proceso de cavitación hidrodinámica.**

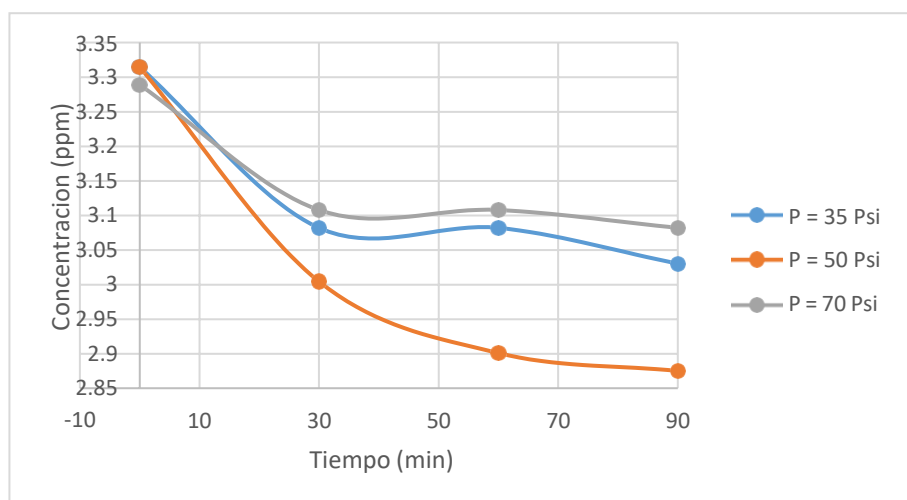
Exp.	Concentración inicial (ppm)	Tiempo	min	0	30	60	90
1	2	pH		6	6.0	6.5	6.5
		Presión inicial	Psi	35	35	35	35
		Presión final	Psi	32	32	33	33
		Temperatura	°C	21	23	24	25
		Caudal	L/s	0.034	0.034	0.034	0.034
2	8	pH		6	6.5	6.5	6.5
		Presión inicial	Psi	35	35	35	35
		Presión final	Psi	33	33	33	33
		Temperatura	°C	21	24	24	26
		Caudal	L/s	0.034	0.034	0.034	0.034
3	2	pH		6	6.0	6.5	6.5
		Presión inicial	Psi	50	50	50	50
		Presión final	Psi	47	47	48	48
		Temperatura	°C	21	25	26	27
		Caudal	L/s	0.03	0.03	0.03	0.03
4	8	pH		6	6.5	6.5	6.5
		Presión inicial	Psi	50	50	50	50
		Presión final	Psi	48	48	48	48
		Temperatura	°C	21	25	26	27
		Caudal	L/s	0.03	0.03	0.03	0.03

Exp.	Concentración inicial (ppm)	Tiempo	min	0	30	60	90
5	2	pH		6	6.0	6.5	6.5
		Presión inicial	Psi	70	70	70	70
		Presión final	Psi	67	68	68	68
		Temperatura	°C	21	23	26	27
		Caudal	L/s	0.027	0.027	0.027	0.027
6	8	pH		6	6.5	6.5	6.5
		Presión inicial	Psi	70	70	70	70
		Presión final	Psi	67	68	68	68
		Temperatura	°C	21	23	25	26
		Caudal	L/s	0.027	0.027	0.027	0.027

En la figura 18 podemos observar la variación del % de degradación del colorante tartrazina en función del tiempo y presión, con 50 Psi de presión, hay mayor % de degradación.

### Figura 18

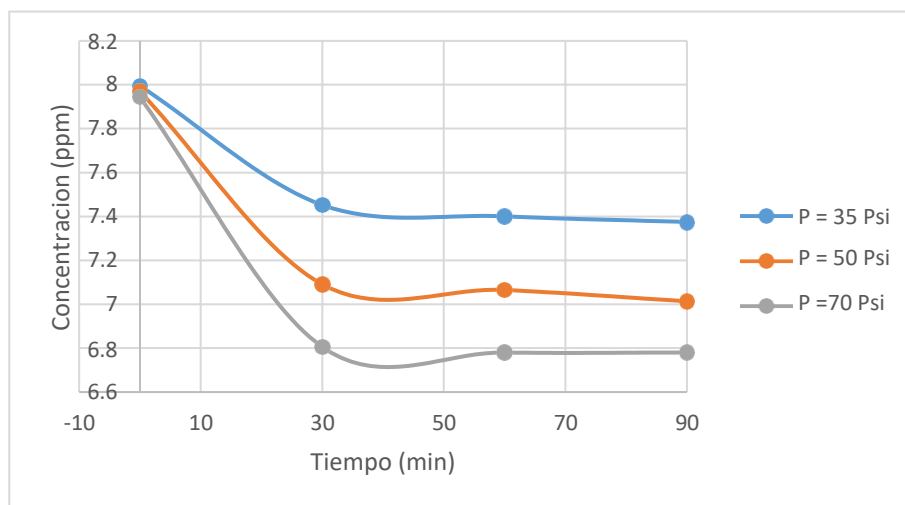
*Efecto de las presiones en la concentración de 2 ppm vs tiempo*



En la figura 19 podemos observar la variación del % de degradación del colorante tartrazina de 8 ppm en función del tiempo y presión, con 70 Psi de presión, hay mayor % de degradación.

**Figura 19**

*Efecto de las presiones en la concentración de 8 ppm vs tiempo*



De la figura 20 se observa que el mayor % de degradación de tartrazina se presenta en el experimento No. 6 con 8 ppm de concentración y en el experimento Nro. 03 con 2 ppm de concentración.

**Figura 20**

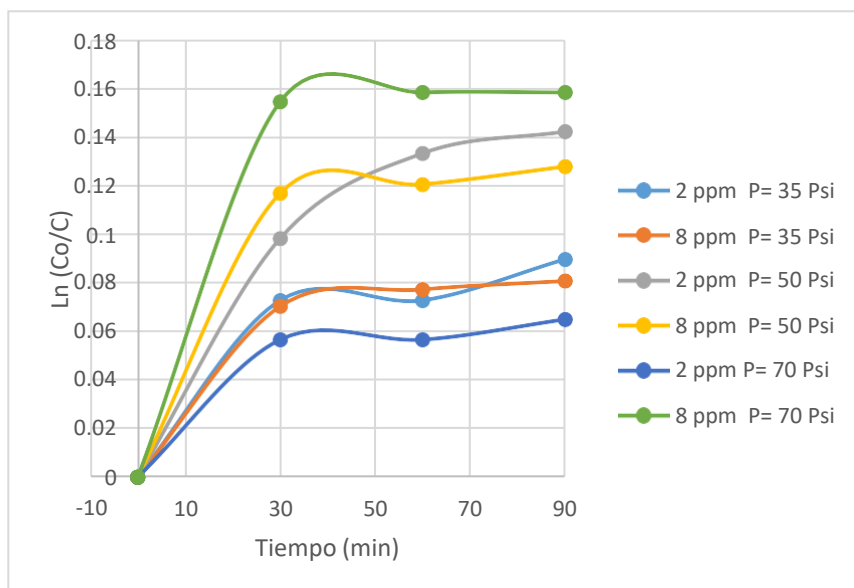
*Porcentaje de remoción del colorante de tartrazina de cada experimento*



En la figura 21 podemos observar la constante de velocidad de reacción de la degradación de tartrazina de 2 y 8 ppm en función del tiempo y presión

**Figura 21**

*Ln de la concentración de tartrazina 2 y 8 ppm vs tiempo*



### 5.1.2 Resultados experimentales de los procesos de Electrocoagulación

En la siguiente tabla 15 se presenta los resultados obtenidos en las doce (12) pruebas experimentales del proceso de electrocoagulación, con muestras tomadas cada 30 minutos.

**Tabla 15**

**Resultados de las pruebas del proceso electrocoagulación**

Exp	Tiempo min	Concentración (ppm)	Potencial Eléctrico V	NaCl (g/L)	Abs.	Concentración Tartrazina ppm	% Reducción de Tartrazina
1	0	2	7.7	0.25	0.181	4.65958	0.000
	30		7.7		0.041	1.03857	77.711
	60		7.7		0.012	0.28850	93.808
	90		7.7		0.006	0.13332	97.139
2	0	2	7.7	0	0.181	4.65959	0.000
	30		7.7		0.096	2.46111	47.182
	60		7.7		0.091	2.33179	49.957
	90		7.7		0.084	2.15073	53.843
3	0	8	7.7	0.25	0.334	8.61684	0.000
	30		7.7		0.134	3.44396	60.032
	60		7.7		0.107	2.74562	68.137
	90		7.7		0.055	1.40067	83.745

Exp	Tiempo min	Concentración (ppm)	Potencial Eléctrico V	NaCl (g/L)	Abs.	Concentración Tartrazina ppm	% Reducción Tartrazina
4	0	8	7.7	0	0.300	7.73745	0.000
	30		7.7		0.272	7.01324	9.360
	60		7.7		0.246	6.34078	18.051
	90		7.7		0.215	5.53898	28.413
5	0	2	9.2	0.25	0.184	4.73718	0.000
	30		9.2		0.11	2.82321	40.403
	60		9.2		0.076	1.94382	58.967
	90		9.2		0.051	1.29721	72.616
6	0	2	9.2	0	0.182	4.68545	0.000
	30		9.2		0.136	3.49568	25.393
	60		9.2		0.09	2.30592	50.785
	90		9.2		0.028	0.70233	85.010
7	0	8	9.2	0.25	0.337	8.69444	0.000
	30		9.2		0.13	3.34050	61.579
	60		9.2		0.086	2.20247	74.668
	90		9.2		0.08	2.04728	76.453
8	0	8	9.2	0	0.31	7.99610	0.000
	30		9.2		0.194	4.99583	37.522
	60		9.2		0.164	4.21990	47.226
	90		9.2		0.141	3.62501	54.665
9	0	2	11.2	0.25	0.179	4.60785	0.000
	30		11.2		0.041	1.03857	77.461
	60		11.2		0.02	0.49541	89.248
	90		11.2		0.003	0.05572	98.791
10	0	2	11.2	0	0.18	4.63372	0.000
	30		11.2		0.103	2.64216	42.980
	60		11.2		0.095	2.43524	47.445
	90		11.2		0.081	2.07314	55.260
11	0	8	11.2	0.25	0.334	8.61684	0.000
	30		11.2		0.107	2.74562	68.137
	60		11.2		0.034	0.85751	90.048
	90		11.2		0.029	0.72819	91.549
12	0	8	11.2	0	0.305	7.86677	0.000
	30		11.2		0.161	4.14229	47.344
	60		11.2		0.109	2.79735	64.441
	90		11.2		0.057	1.45240	81.538

El % de reducción de tartrazina en el proceso de electrocoagulación para cada experimento, se aprecia que el experimento Nro. 11 es el más óptimo, con 11.2 V de potencial eléctrico, presencia de NaCl a 0.25 g/l y una concentración de 8 ppm de la solución sintética.

En la siguiente tabla 17 se presenta las condiciones iniciales y finales de las pruebas experimentales, en el proceso de electrocoagulación.

**Tabla 16**  
**Condiciones del proceso de electrocoagulación**

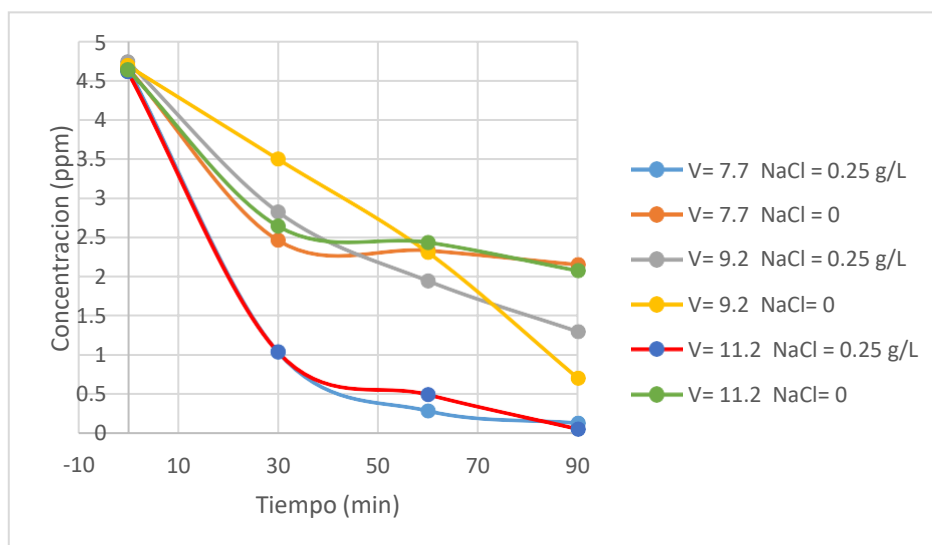
Exp.	Tiempo (min)	pH	T° (°C)	Consumo Electroodos (g)	Concentración Tartrazina (ppm)	Ln (Co/C)	Consumo de energía (KWh/l)	Cte. Velocidad de Reacción k
1 (V = 7.7)	0	6	21	2.19	4.65959	0.0000	0	0.00000
	30	6.2	22		1.03857	1.5011	3.85	0.05004
	60	6.3	24		0.28850	2.7820	8.3	0.04637
	90	6.5	26		0.13332	3.5540	13.48	0.03949
2 (V = 7.7)	0	6	21	0.84	4.65959	0.0000	0	0.00000
	30	6.1	24		2.46111	0.6383	0.11	0.02128
	60	6.3	26		2.33179	0.6923	0.34	0.01154
	90	6.4	28		2.15074	0.7731	0.51	0.00859
3 (V = 7.7)	0	6	21	3.19	8.61684	0.0000	0	0.00000
	30	6.3	22		3.44396	0.9171	4.77	0.03057
	60	6.4	25		2.74562	1.1437	10.01	0.01906
	90	6.5	28		1.40067	1.8168	15.72	0.02019
4 (V = 7.7)	0	6	21	0.38	7.73745	0.0000	0	0.00000
	30	6.2	24		7.01325	0.0983	0.13	0.00328
	60	6.3	28		6.34078	0.1991	0.39	0.00332
	90	6.4	29		5.53898	0.3343	0.58	0.00371
5 (V = 9.2)	0	6	21	2.11	4.73718	0.0000	0	0.00000
	30	6.3	23		2.82321	0.5176	4.68	0.01725
	60	6.4	25		1.94382	0.8908	13.08	0.01485
	90	6.5	27		1.29721	1.2952	22.23	0.01439
6 (V = 9.2)	0	6	21	0.08	4.68545	0.0000	0	0.00000
	30	6.2	24		3.49569	0.2929	0.08	0.00976
	60	6.4	27		2.30593	0.7090	0.36	0.01182
	90	6.5	29		0.70233	1.8978	0.77	0.02109
7 (V = 9.2)	0	6	21	2.47	8.69444	0.0000	0	0.00000
	30	6.1	25		3.34050	0.9566	6	0.03189
	60	6.4	27		2.20247	1.3731	14.5	0.02289
	90	6.5	29		2.04728	1.4462	27.6	0.01607

Exp.	Tiempo (min)	pH	T° (°C)	Consumo Electroodos (g)	Concentración Tartrazina (ppm)	Ln (Co/C)	Consumo de energía (KWh/l)	Cte. Velocidad de Reacción k
8 (V = 9.2)	0	6	21	0.06	7.99610	0.0000	0	0.00000
	30	6.2	26		4.99583	0.4704	0.15	0.01568
	60	6.4	27		4.21989	0.6391	0.46	0.01065
	90	6.5	28		3.62501	0.7911	0.92	0.00879
9 (V = 11.2)	0	6	21	3.4	4.60786	0.0000	0	0.00000
	30	6.2	28		1.03857	1.4899	8.28	0.04966
	60	6.3	29		0.49542	2.2301	19.29	0.03717
	90	6.4	30		0.05572	4.4151	32.85	0.04906
10 (V = 11.2)	0	6	21	0.2	4.63372	0.0000	0	0.00000
	30	6.1	26		2.64216	0.5618	0.09	0.01873
	60	6.3	29		2.43525	0.6433	0.31	0.01072
	90	6.5	31		2.07315	0.8043	0.47	0.00894
11 (V = 11.2)	0	6	21	2.16	8.61684	0.0000	0	0.00000
	30	6.1	25		2.74562	1.1437	5.48	0.03812
	60	6.2	29		0.85752	2.3074	16.8	0.03846
	90	6.3	31		0.72820	2.4709	34.53	0.02745
12 (V = 11.2)	0	6	21	0.88	7.86678	0.0000	0	0.00000
	30	6.3	27		4.14230	0.6414	0.12	0.02138
	60	6.4	29		2.79735	1.0340	0.31	0.01723
	90	6.5	31		1.45240	1.6894	0.56	0.01877

En la figura 22 podemos observar la variación del % de degradación de tartrazina de 2 ppm en función del tiempo, potencial eléctrico y NaCl.

### Figura 22

*Efecto del potencial eléctrico y NaCl en la degradación del colorante tartrazina de 2 ppm vs tiempo*

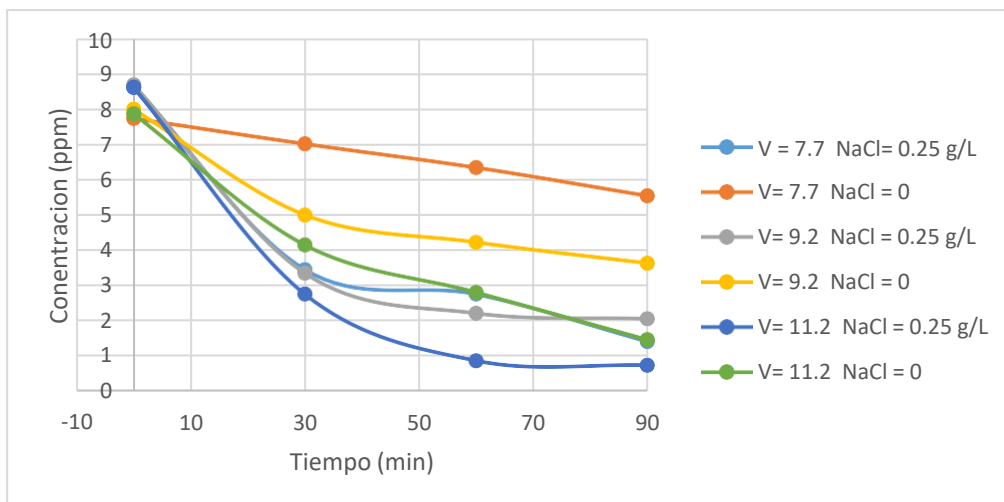




En la figura 23 podemos observar la variación del % de degradación de tartrazina de 8 ppm en función del tiempo, potencial eléctrico y NaCl

**Figura 23**

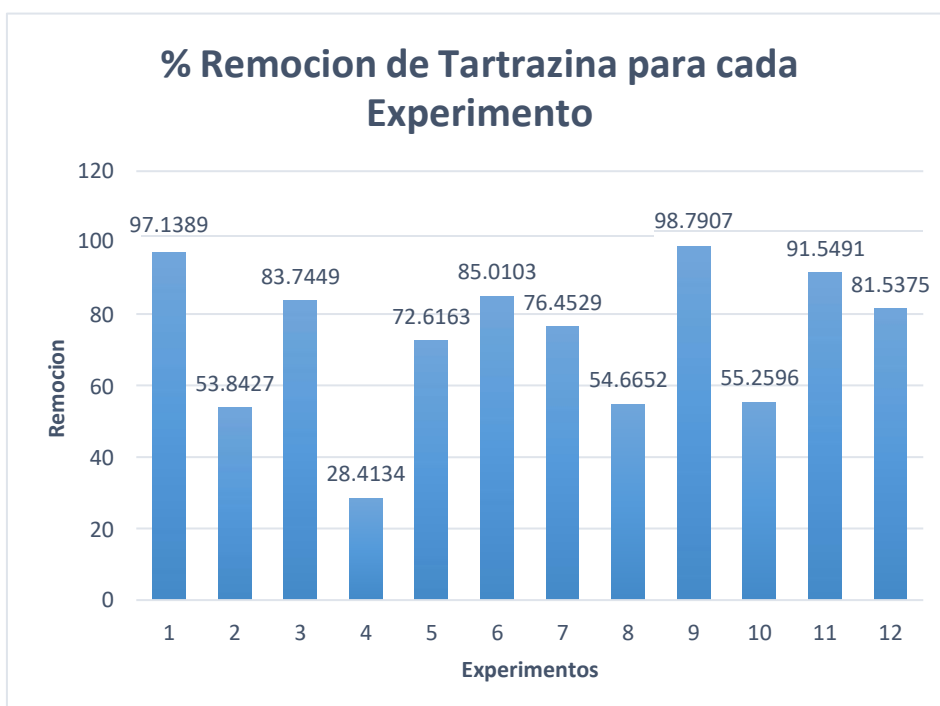
*Efecto del potencial eléctrico y NaCl en la degradación del colorante tartrazina de 8 ppm vs tiempo*



De la figura 24 se observa que el experimento N° 9 tiene mayor porcentaje de degradación de tartrazina, seguido del exp. N° 1 y exp. N° 11.

**Figura 24**

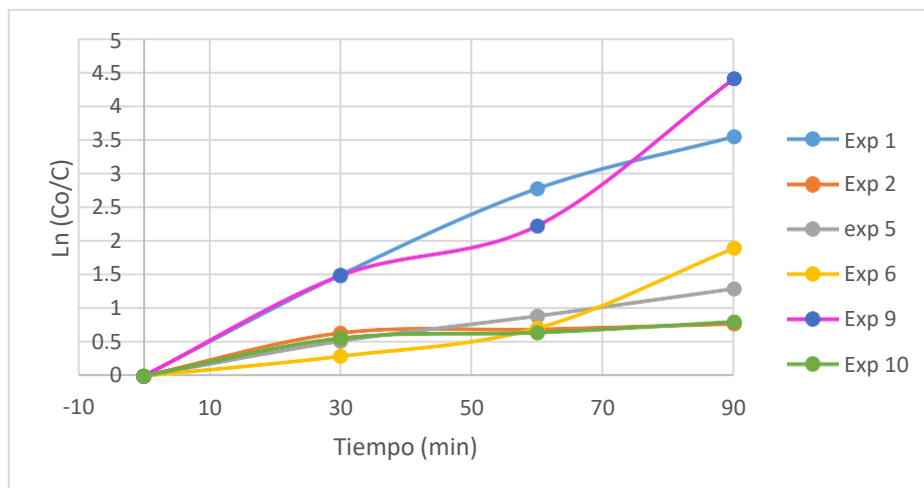
*Porcentaje de remoción del colorante tartrazina para cada experimento*



En la figura 25 podemos observar que el exp. N<sup>o</sup> 9 presenta el punto máximo de la constante de velocidad de reacción de la degradación, en función del tiempo y concentración de la solución de 2 ppm.

**Figura 25**

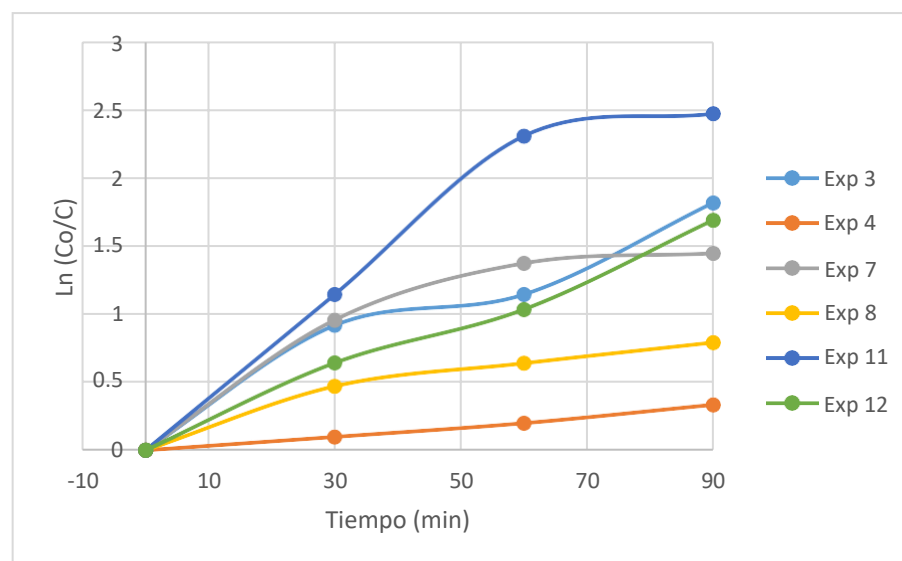
*Ln de la concentración de tartrazina de 2 ppm vs tiempo*



En la figura 26 podemos observar que el exp. N<sup>o</sup> 11 presenta el punto máximo de la constante de velocidad de reacción de la degradación, en función del tiempo y concentración de la solución de 8 ppm.

**Figura 26**

*Ln de la concentración de tartrazina de 8 ppm vs tiempo*



En la tabla 17 se aprecian las intensidades de corriente de las pruebas experimentales en función del tiempo, del proceso de electrocoagulación.

**Tabla 17**

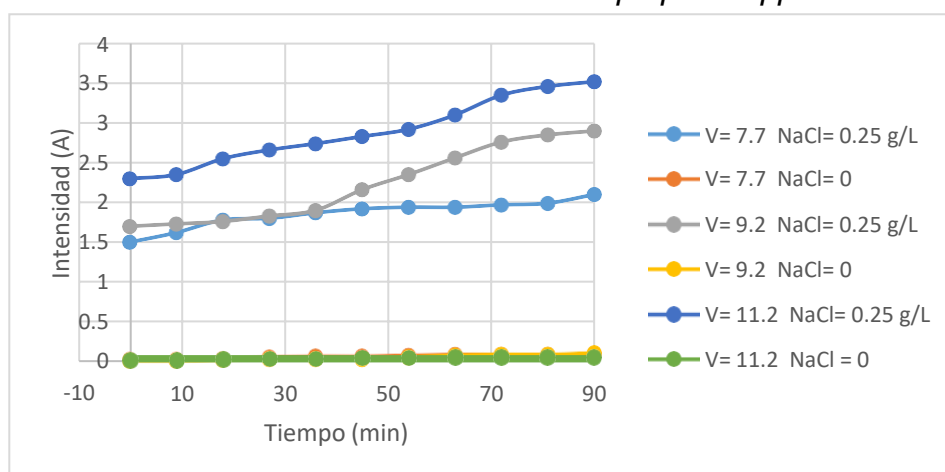
**Intensidad de corriente en función de tiempo de electrocoagulación**

Tiempo (min)	Intensidad de Corriente (A)										
	0	9	18	27	36	45	54	63	72	81	90
1	1.5	1.62	1.78	1.8	1.87	1.92	1.94	1.94	1.97	1.99	2.1
2	0.02	0.02	0.03	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08
3	2	2.1	2.15	2.2	2.23	2.25	2.25	2.34	2.36	2.4	2.45
4	0.01	0.04	0.04	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09
5	1.7	1.73	1.76	1.83	1.9	2.16	2.35	2.56	2.76	2.85	2.9
6	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.05	0.07	0.08	0.08	0.1
7	1.4	1.43	1.96	2.34	2.35	2.56	2.75	2.83	2.96	3.34	3.6
8	0.01	0.03	0.05	0.06	0.06	0.08	0.08	0.09	0.1	0.11	0.12
9	2.3	2.35	2.55	2.66	2.74	2.83	2.92	3.1	3.35	3.46	3.52
10	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05
11	1.26	1.42	1.55	1.76	1.85	2.13	2.53	2.7	3.14	3.36	3.7
12	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06

En la figura 27 podemos observar la intensidad de corriente en función del tiempo, para la solución con concentración de 2 ppm, donde se aprecia un aumento en la intensidad de corriente con 11.2 V y con presencia de NaCl.

**Figura 27**

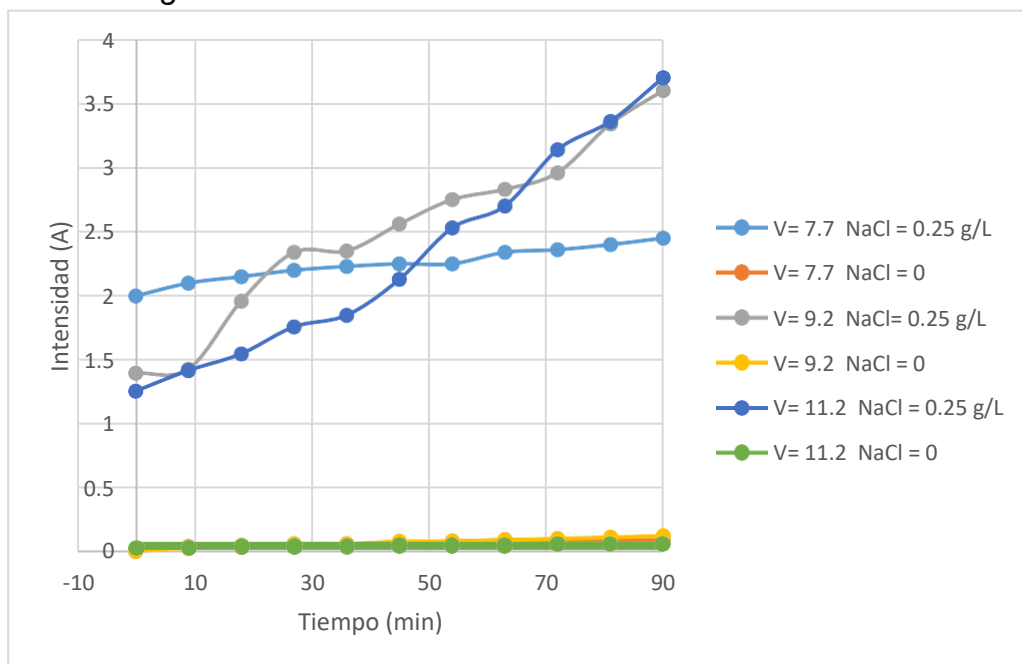
*intensidad de corriente en función del tiempo para 2 ppm*



En la figura 28 podemos observar la intensidad de corriente en función del tiempo, para la solución con concentración de 8 ppm, donde se aprecia un aumento en la intensidad de corriente con 11.2 V y con presencia de NaCl

**Figura 28**

*Intensidad de corriente en función del tiempo para 8 ppm del proceso de electrocoagulación*



### 5.1.3 Resultado experimental del proceso integrado con los parámetros adecuados

En la tabla N° 18, se muestra los factores y niveles adecuados obtenidos de los experimentos de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación.

**Tabla 18**

**Factores y nivel del proceso integrado obtenidos**

<b>Factor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Nivel</b>
Potencial eléctrico	V	11.2
Presión de alimentación	Psi	50
Concentración inicial de colorante de tartrazina	mg/L	2
Cantidad de NaCl	g/L	0.25

En la tabla 19 se observa el resultado de las pruebas experimentales del proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación.

**Tabla 19**

**Resultados del proceso integrado, según nuestro diseño**

Presión (Psi)	Tiempo (min)	Conc. (ppm)	Potencial Eléctrico (V)	NaCl (g/L)	Concentración Tartrazina (ppm)	% Reducción de Tartrazina	Cte. Velocidad de Reacción k
50	0	2	11.2	0.25	1.7628	0	0
50	30	2	11.2	0.25	0.9868	44.018	0.0193
50	60	2	11.2	0.25	0.3661	79.232	0.0262
50	90	2	11.2	0.25	0.1592	90.970	0.0267

En la tabla 20 se aprecia las condiciones iniciales y finales de las pruebas experimentales del proceso integrado.

**Tabla 20**

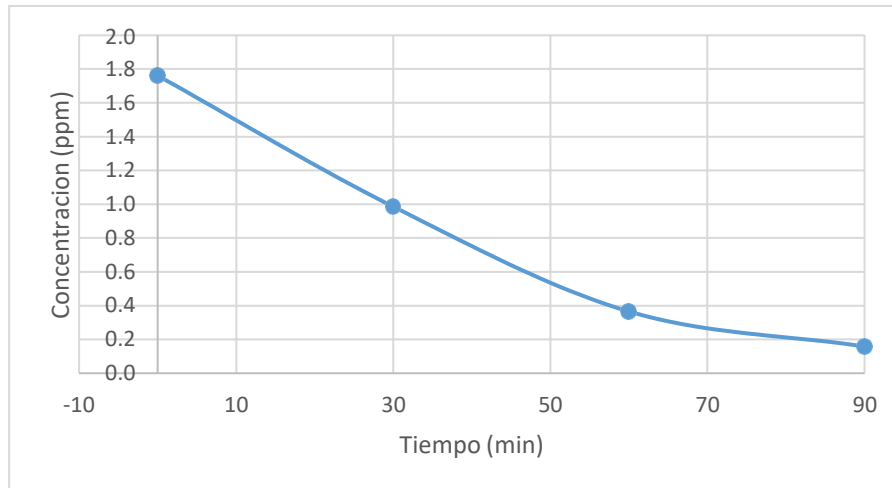
**Condiciones iniciales y finales del proceso integrado.**

Potencial eléctrico	Concentración inicial (ppm)	Tiempo	min	0	30	60	90
11.2 V	2	pH		6	6.0	6.5	6.5
		Presión inicial	Psi	50	50	50	50
		Presión final	Psi	47	48	48	48
		Temperatura	°C	21	27	30	32
		Caudal	L/s	0.030	0.030	0.030	0.030
		Consumo de energía	(KWh/L)	0	4.14	9.64	16.57
		Consumo de electrodos	(g)	0	---	----	3.4
		Intensidad De corriente	A	2.30	2.66	3.1	3.55

En la figura 29 podemos observar la variación del % de degradación de tartrazina del proceso integrado en función del tiempo, potencial eléctrico y presencia de NaCl.

**Figura 29**

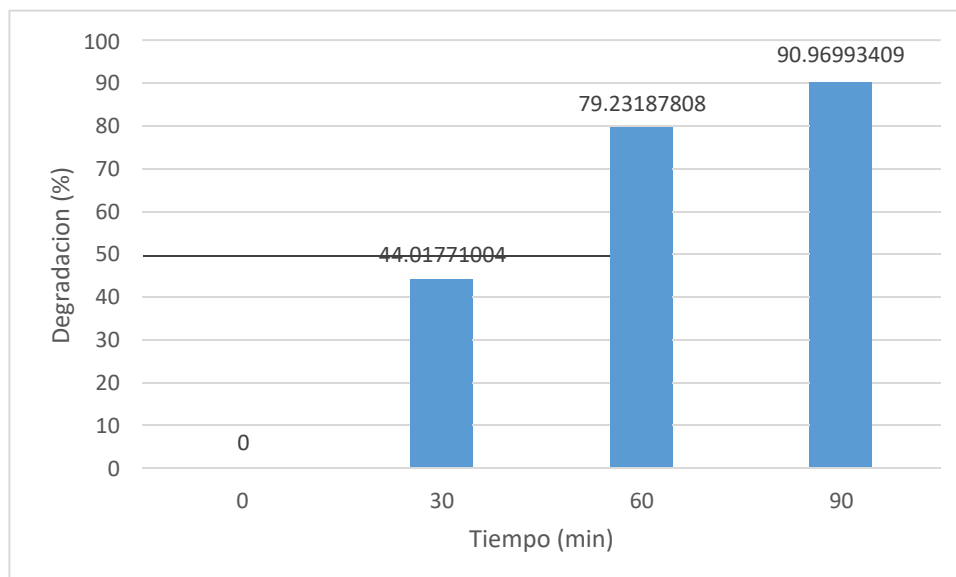
*Efecto de los parámetros en la degradación de tartrazina en el proceso integrado vs tiempo*



De la figura 30 se observa un mayor porcentaje de degradación de tartrazina en 90 min mediante el proceso integrado.

**Figura 30**

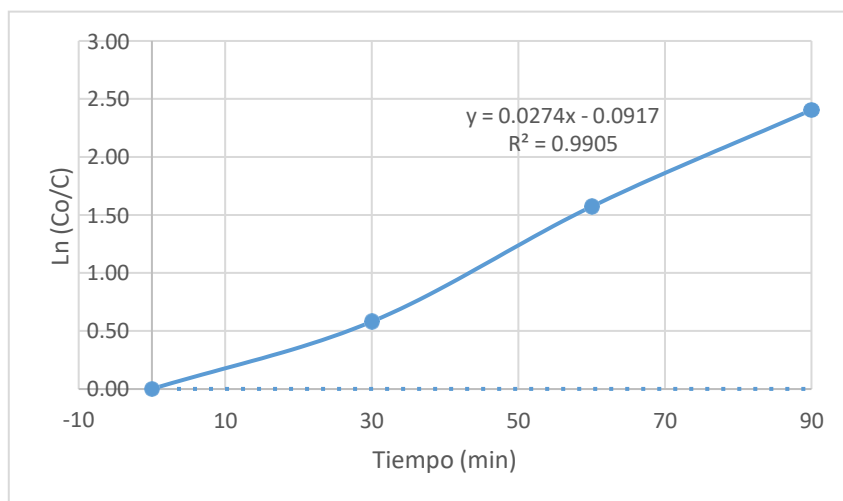
*Porcentaje de degradación del colorante tartrazina en el proceso integrado*



En la figura 31 se observa el % de degradación del proceso integrado, en función al tiempo del proceso, con una duración de 90 min.

**Figura 31**

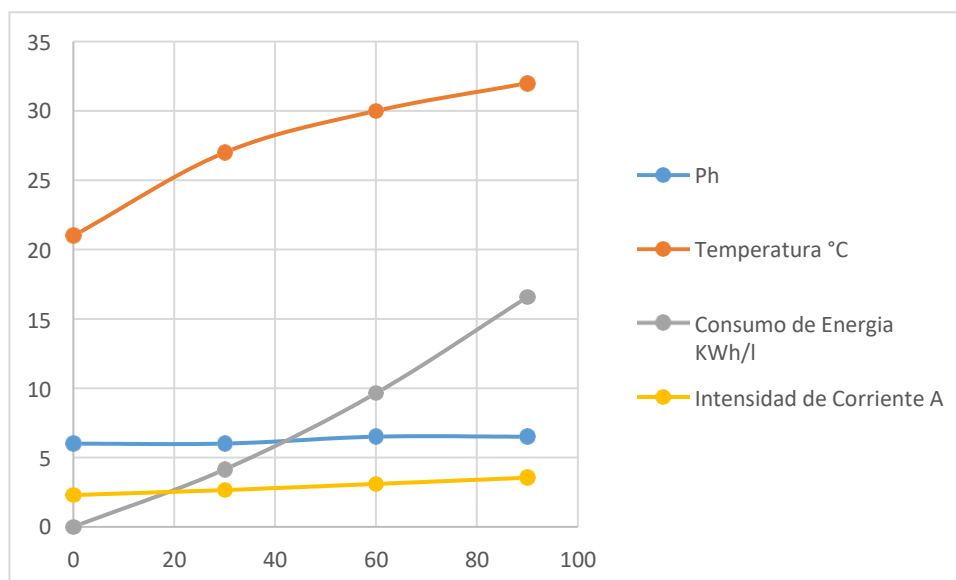
*Ln de la concentración de tartrazina en el proceso integrado vs tiempo*



En la figura 32 podemos observar el comportamiento de las condiciones de operación en función al tiempo del proceso integrado.

**Figura 32**

*Comportamiento de la intensidad de corriente, pH, T °C en función del tiempo.*

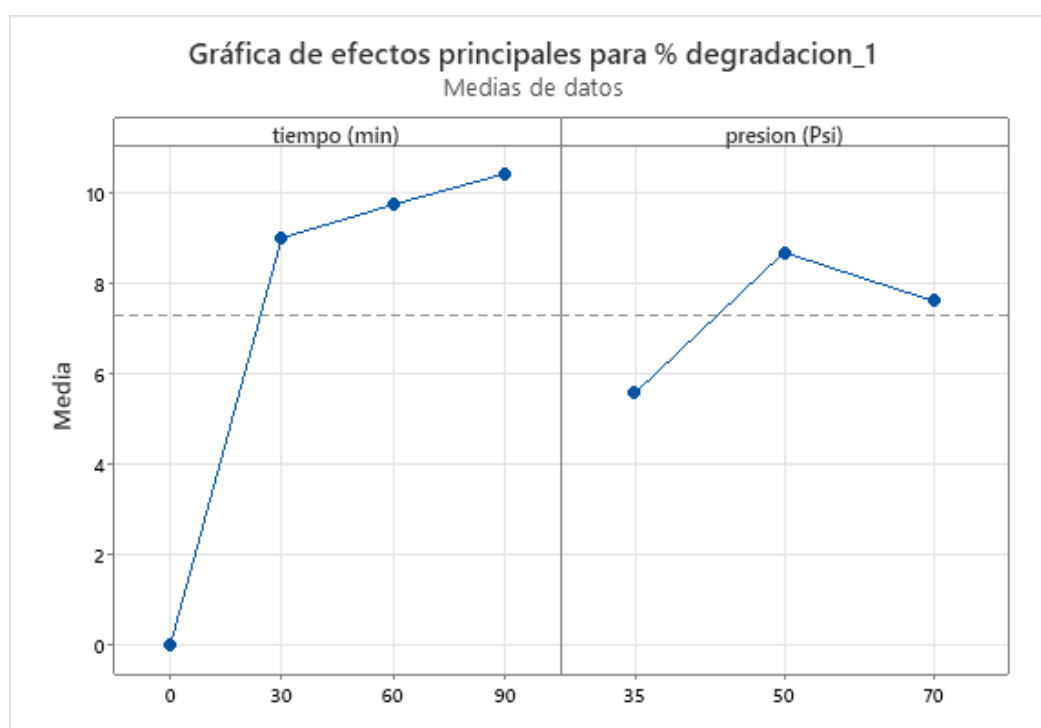


## 5.2 Resultados inferenciales

En la figura 33 se muestra el comportamiento de las variables independientes del proceso de cavitación hidrodinámica con relación al porcentaje de degradación del colorante de tartrazina. Podemos observar que, a mayor tiempo, mayor será su porcentaje de degradación, y para la presión, a 50 Psi en el proceso, aumenta el porcentaje de degradación.

### Figura 33

*Efectos de las variables del Proceso de cavitación Hidrodinámica en la degradación de la tartrazina.*



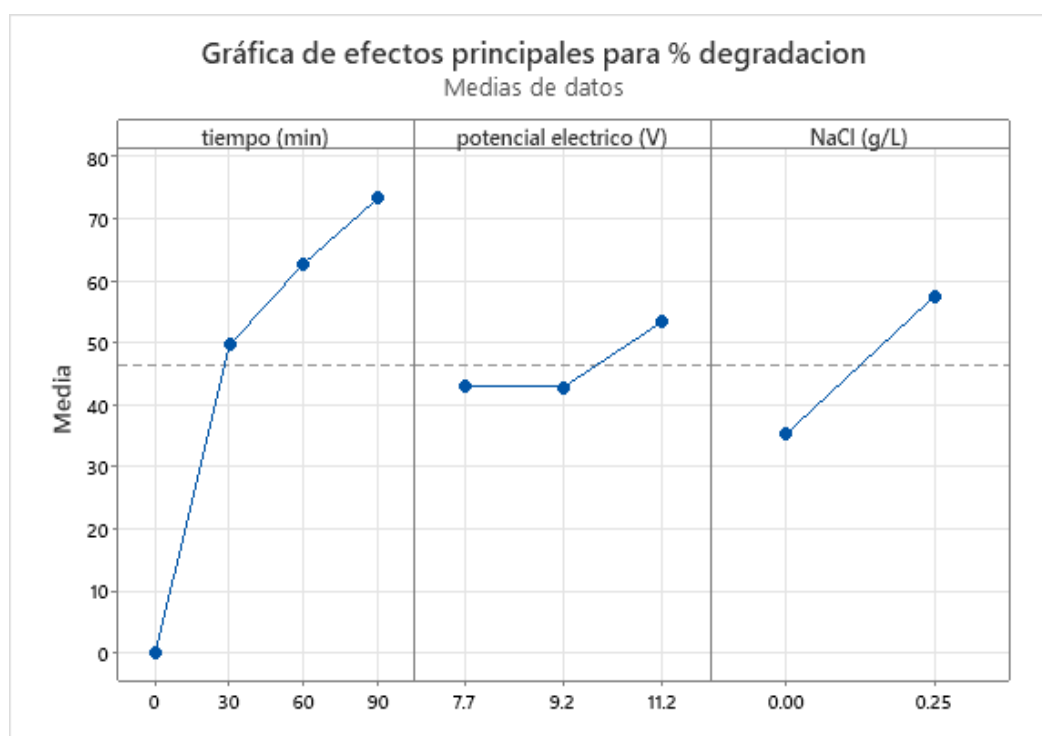
6



En la figura 34 se muestra el comportamiento de las variables independientes del proceso de electrocoagulación con relación al porcentaje de degradación. Podemos observar que, a mayor tiempo, mayor será su porcentaje de degradación, y para el potencial eléctrico 11.2 V y con NaCl 0.25g/L, en el proceso, aumenta el porcentaje de degradación.

**Figura 34**

*Efecto de las variables del Proceso de electrocoagulación en la degradación de la tartrazina.*



Los resultados experimentales expuestos en la tabla 13 fueron sometidos a un análisis estadístico con el objetivo de comprobar, aceptar o rechazar las hipótesis planteadas. Para el proceso individual de cavitación hidrodinámica, se realizó el análisis de varianza, tal como se muestra en la Tabla 21.

**Tabla 21****Análisis de varianza (ANOVA) del Proceso de cavitación hidrodinámica**

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tiempo (min)	3	431.71	143.904	22.54	0.000
Presión (Psi)	2	39.96	19.978	3.13	0.070
Concentración inicial	1	25.99	25.990	4.07	0.060
Error	17	108.54	6.385		
Total	23	606.20			

Se consideró el resumen del modelo utilizado, dando valor al R<sup>2</sup> en un 82% siendo correlativo y demostrando que existe una buena relación entre las variables, de tal forma la desviación estándar, tal como se muestra en la Tabla 22.

**Tabla 22****Resumen del modelo utilizado para la degradación de tartrazina**

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)
2.52681	82.09%	75.78%

En la Tabla 15 se muestran los resultados experimentales sometidos a un análisis estadístico con el objetivo de comprobar, aceptar o rechazar la hipótesis planteada. Para el proceso individual de electrocoagulación, se realizó el análisis de varianza, tal como se muestra en Tabla 23.

**Tabla 23****Análisis de varianza (ANOVA) del proceso de electrocoagulación**

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Tiempo	3	37811	12603.6	65.76	0.000
Potencial eléctrico	2	1175	587.4	3.07	0.057
NaCl	1	5942	5942.5	31.01	0.000
Error	41	7857	191.6		
Total	47	52786			

Se consideró el resumen del modelo utilizado. Dando valor al  $R^2$  en un 85% siendo correlativo y demostrando que existe una buena relación entre las variables, tal como se muestra en la Tabla 24.

**Tabla 24**

**Resumen del modelo utilizado para la degradación de tartrazina**

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)
13.8244	85.52%	82.98%

En la tabla 19 se muestra el resultado experimental del proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación, fue sometido a un análisis de regresión, tal como se muestra en la tabla 25.

**Tabla 25**

**Análisis de varianza del análisis de regresión del proceso integrado**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	4747.0	4747.0	35.00	0.027
tiempo (min)	1	4747.0	4747.0	35.00	0.027
Error	2	271.3	135.6		
Total	3	5018.3			

Se consideró el resumen del modelo utilizado, dando valor al  $R^2$  en un 94% siendo correlativo y demostrando que existe una buena relación entre las variables, tal como se muestra en la en la Tabla 26.

**Tabla 26**

**Resumen del modelo utilizado para la degradación de tartrazina**

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	R-cuadrado (pred)
11.6461	94.59%	91.89%	65.23%

Donde se verifica el valor de  $R^2$  siendo un valor aceptable, lo que demuestra que el modelo describe adecuadamente el comportamiento de la degradación de tartrazina.

Por esta razón, se rechaza la hipótesis nula y se afirma que la aplicación del proceso integrado permitela degradación del colorante de tartrazina en la solución sintética. De los resultados obtenidos en cada proceso, el mayor porcentaje de degradación del colorante tartrazina en la solución sintética de 2 ppm, en el proceso de cavitación hidrodinámica, se da a presión = 50 Psi, logrando una reducción en un tiempo de 90 minutos, asimismo el mayor porcentaje de degradación del colorante tartrazina en la solución sintética de 2 ppm, en el proceso de electrocoagulación se da a un voltaje = 11.2 y con presencia de NaCl = 0.25 g/L. logrando una reducción en un tiempo de 90 minutos. Integrando estos dos procesos, cavitación hidrodinámica y electrocoagulación, satisfactoriamente se logra una degradación del 90.97% en un tiempo de 90 minutos.

También se observa que el proceso de electrocoagulación tiene bajo consumo de energía, en 11.2 V, incrementándose a mayor intensidad, el consumo de energía es Intensidad x Tiempo, a mayor voltaje mayor intensidad con NaCl.

## **VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados**

De acuerdo a los resultados obtenidos en los experimentos de cada proceso, se hallaron los parámetros adecuados para realizar el proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación, logrando experiencias como se muestran en las Tablas 13, 15 y 19, donde se aprecia las condiciones iniciales y el porcentaje de degradación del colorante en la solución sintética. De igual forma de acuerdo a las Figuras 21, 25, 26 y 31 se demuestra que la degradación del colorante tartrazina en la solución sintética, se asume un comportamiento de primer orden, de acuerdo a la constante cinética de velocidad, así como también la constante de equilibrio de adsorción del colorante.

Asimismo, conforme a la hipótesis general planteada se ha logrado demostrar que, mediante el proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación, el colorante tartrazina en la solución sintética se degradó un 90.97%. las condiciones adecuadas para el proceso integrado fueron: la concentración de tartrazina a 2ppm, en presencia de NaCl a 0.25g/L, el potencial eléctrico a 11.2 V y la presión de alimentación a 50 Psi en un tiempo de 90min.

### **6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares.**

Se comprobó una reducción en el consumo de energía, debido que el proceso individualizado de electrocoagulación obtuvo un gasto de energía de 34.53 KWh/l a diferencia del proceso integrado, el cual obtuvo un gasto de energía de 16.57 KWh/l, menos de la mitad del consumo que realiza un solo proceso.

En la Tabla 19 y Figura 29 se muestra la degradación del colorante tartrazina mediante el proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación, con los parámetros adecuados obtenidos al realizar los diferentes experimentos, se logró degradar hasta un 90.97%, con un procedimiento limpio, a diferencia del trabajo realizado respecto a cavitación hidrodinámica en la industria textil donde los autores estudiaron la degradación del reactivo rojo 120 (RR120), utilizando HC a 3,5 kg/cm<sup>2</sup>, 30 °C, pH = 2 y 10 mg/l de concentración del colorante en solución acuosa, logrando un 74% de decoloración. Siendo un porcentaje de degradación aceptable pero menos

efectivo como se demuestra en el trabajo de investigación para la degradación del colorante tartrazina mediante el proceso integrado.

La nueva tecnología con la unión de dos procesos logró un 90.97% de degradación del colorante tartrazina mediante el proceso integrado, además se obtuvo un gasto mínimo de energía de 16.57 KWh/l, a comparación del trabajo realizado por los autores Barrios-Ziolo L, Gaviria-Restrepo L, Agudelo E et al. Quienes utilizaron el procedimiento de electrocoagulación, con los valores de densidad de corriente entre 4.45 y 200 A/m<sup>2</sup>, alcanzando un porcentaje de remoción de color del 90%, en tiempo de operación inferiores a 120 minutos.

Se demostró que, mediante el proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación, el colorante tartrazina (E-102) tuvo una degradación del 90.97%, siendo una tecnología amigable y una propuesta satisfactoria y al mismo tiempo viable.

### **6.3 Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes (el autor de la investigación se responsabiliza por la información emitida en el informe)**

Los autores de la presente investigación se responsabilizan por la información emitida en la presente tesis, de acuerdo con el Reglamento del Código de Ética de investigación de la UNAC, Resolución del Consejo Universitario N° 260-2019.

## VII. CONCLUSIONES

1. Se determinó el porcentaje de degradación del colorante de tartrazina en la solución sintética, mediante el proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación en un 90.97%, con las condiciones adecuadas, obteniendo un menor consumo de energía eléctrica siendo el total de 16.32 (KWh/L) y la constante cinética de la degradación de tartrazina fue evaluado asumiendo un comportamiento de 1er orden obteniéndose una constante de velocidad de  $26.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Se demostró la viabilidad y confiabilidad en la técnica del proceso integrado.
2. Se evaluó cada parámetro de operación en cada uno de los experimentos realizados del proceso de cavitación hidrodinámica, siendo los más adecuados utilizar una concentración de 2ppm del colorante tartrazina en la solución sintética, con una presión de 50 Psi, y en el tiempo de operación de 90 min, donde alcanzó un mayor porcentaje de degradación.
3. Se evaluó cada parámetro de operación en cada uno de los experimentos realizados del proceso de electrocoagulación, siendo los más adecuados utilizar una concentración de 2ppm de colorante tartrazina en la solución sintética, el potencial eléctrico de 11.2 V, presencia de NaCl a 0.25g/L para una mejor conductividad y en el tiempo de operación de 90 min, donde alcanzó un mayor porcentaje de degradación.

## VIII. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar adecuada y prolijamente el armado de los equipos, para adaptar los soportes y tuberías, de esa forma, tener una adecuada manipulación, sin alterar ningún factor o condición y tener una mejor evaluación de inicio a fin.
2. Se sugiere elegir adecuadamente los parámetros y condiciones del diseño experimental a trabajar, con el cual se realizará el análisis de las muestras en los procesos individuales y en el integrado, de esa forma tener una fiabilidad en los experimentos a realizar.
3. Se sugiere tener la información técnica y estandarizada de cada instrumento, adquirir las capacidades conocimientos para el adecuado uso y lectura de los equipos y contar con la interpretación adecuada de todos los experimentos con los cuales se va a trabajar.
4. Seleccionar adecuadamente los horarios y tiempos para realizar el trabajo de investigación, tanto de los bachilleres y de la empresa o institución donde se realizará el desarrollo experimental.
5. Calibrar los equipos de medición analítica, que garanticen la confiabilidad de los resultados, y de esa manera realizar las corridas experimentales con transparencia antes y durante los procesos.
6. Mantener el orden en las tomas de datos de cada experimento, para evitar duplicar, alterar, confundir o repetir los experimentos generado mayor gasto de insumos, tiempo, generando fatiga.



## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] "Estudio de los tratamientos de aguas residuales en las industrias farmacéuticas", Accessed: Jul. 24, 2023. [Online]. Available: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/26523>
- [2] F. Alarcón and M. Angel De Dios, "REMOCIÓN DEL COLORANTE ROJO-G Y PROCESO DE BIO-ADSORCIÓN CON SUBSECUENTE FILTRACIÓN POR MEMBRANAS PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES TEXTILES Tesis presentada por el Bachiller."
- [3] J. C. Ramirez-Rodriguez, "Tratamiento de aguas residuales y problemáticas ambientales del sector textil en Colombia: una revisión," *Informador Técnico*, vol. 87, no. 1, pp. 82–106, Mar. 2023, doi: 10.23850/22565035.5304.
- [4] C. De Arte, D. Empresarial, D. De Ventanilla, R. A. Amaya, and J. Asesor, "FACULTAD DE ARTES Y HUMANIDADES LA PRESENCIA DE TARTRAZINA EN EL ORGANISMO DE LOS NIÑOS DE 6 A 7 AÑOS PERTENECIENTES AL NIVEL SOCIOECONÓMICO C DEBIDO AL CONSUMO CONSTANTE DE ALIMENTOS ADITIVOS EN EL."
- [5] J. Lizbeth, D. Contreras, B. Camilo, and R. Garavito, "Optimización y arranque del sistema primario de una planta de tratamiento de agua residual industrial proveniente de una empresa de alimentos mediante la técnica de cavitación hidrodinámica," 2015. [Online]. Available: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria)
- [6] "Corantes Alimentícios Amarantho, Eritrosina B e Tartrazina, e seus possíveis Efeitos Maléficos à Saúde Humana.pt.ESPAÑOL", Accessed: Jul. 24, 2023. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12466/1903>
- [7] L. Eduardo Cárdenas Vega, D. Delgado Henao, M. Alejandra Garcia Valencia, H. Gerardo Gómez Calderón, M. Camila Gutiérrez Criollo, and M. Camila Sanchez Bermeo, "Evaluación de la Electrocoagulación como Alternativa para el Tratamiento de Aguas residuales en Empresas de Decolorado Textil."
- [8] M. G. Donoso Morcillo, "Eliminación de colorantes alimentarios en disolución acuosa mediante procesos químicos y electroquímicos de oxidación avanzada," Dec. 2016, Accessed: Jul. 24, 2023. [Online]. Available: <http://dehesa.unex.es/handle/10662/5173>
- [9] D. De, L. C. Del, H. Asosora, and L. Lazo Jimenez, "UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS ESCUELA PROFESIONAL DE CIENCIAS DE LA NUTRICIÓN Tesis presentado por el Bachiller: FAVIO YUNIOR COAQUIRA PARI Para optar el Título Profesional de LICENCIADO EN NUTRICIÓN."
- [10] A. Cortazar-Martínez, C. González-Ramírez, C. Coronel-Olivares, J. Escalante-Lozada, J. Castro-Rosas, and J. Villagómez-Ibarra, "Biotecnología aplicada a la

degradación de colorantes de la industria textil,” *Universidad y ciencia*, vol. 28, no. 2, pp. 187–199, 2012, Accessed: Aug. 23, 2023. [Online]. Available: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-29792012000200009&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792012000200009&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

- [11] “A new process for degradation of Auramine O dye and heat generation based on orifice plate hydrodynamic cavitation (HC) Parameter optimization and performance anal”.
- [12] V. Innocenzi, M. Prisciandaro, M. Centofanti, and F. Vegliò, “Comparison of performances of hydrodynamic cavitation in combined treatments based on hybrid induced advanced Fenton process for degradation of azo-dyes,” *J Environ Chem Eng*, vol. 7, no. 3, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.jece.2019.103171.
- [13] L. V. Malade, U. B. Deshannavar, A. D. Patil, and R. A. Patil, “Parametric studies of degradation of reactive red 120 by a novel approach of hydrodynamic cavitation,” *Mater Today Proc*, vol. 80, pp. 744–746, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.11.080.
- [14] N. Modirshahla, M. A. Behnajady, and S. Kooshaiian, “Investigation of the effect of different electrode connections on the removal efficiency of Tartrazine from aqueous solutions by electrocoagulation,” *Dyes and Pigments*, vol. 74, no. 2, pp. 249–257, 2007, doi: 10.1016/j.dyepig.2006.02.006.
- [15] L. F. Barrios-Ziolo, L. F. Gaviria-Restrepo, E. A. Agudelo, and S. A. Cardona Gallo, “TECNOLOGÍAS PARA LA REMOCIÓN DE COLORANTES Y PIGMENTOS PRESENTES EN AGUAS RESIDUALES,” *Dyna (Medellin)*, vol. 82, no. 191, pp. 118–126, Jun. 2015, doi: 10.15446/dyna.v82n191.42924.
- [16] A. Corporación Universitaria Lasallista, *Producción + limpia.*, vol. 6, no. 2. Corporación Universitaria Lasallista, 2011. Accessed: Jul. 22, 2023. [Online]. Available: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-04552011000200006&lng=en&nrm=iso&tlng=](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552011000200006&lng=en&nrm=iso&tlng=)
- [17] Pablo Belizario DIAZ BRAVO, “DEGRADACION DE LA TARTRAZINA MEDIANTE FOTOCATALISIS SOLAR HETEROGENEA USANDO OXIDO DE ZINC,” CALLAO, Jul. 2020. Accessed: Jul. 22, 2023. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12952/5156>
- [18] R. Rodriguez Espinoza, J. F. Rivero Méndez, and J. L. Mendoza Bobadilla, “Evaluación de colorantes sintéticos en bebidas comercializadas en la ciudad de Trujillo en el periodo 2018 - 2019,” *Alpha Centauri*, vol. 2, no. 3, pp. 124–139, Sep. 2021, doi: 10.47422/ac.v2i3.46.
- [19] M. Bermeo Garay and O. Tinoco Gómez, “Remoción de colorantes de efluente sintético de industria textil aplicando tecnología avanzada,” *Industrial Data*, vol. 19, no. 2, p. 91, Dec. 2016, doi: 10.15381/idata.v19i2.12844.

- [20] A. P. Martin and Maria Jesus Dominguez Gomez, "Revision bibliografica sobre los efectos adversos de los colorantes sinteticos de 2008 a 2021," *Revision Bibliografica*, España, pp. 1–36, 2021. Accessed: Nov. 11, 2023. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12466/1903>
- [21] U. De, I. De, and L. F. De, "UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO "DEGRADACION DE LA TARTRAZINA MEDIANTE FOTOCATALISIS SOLAR HETEROGENEA USANDO."
- [22] E. GilPavas, I. Dobrosz-Gómez, and M. Á. Gómez-García, "Degradación y Mineralización de Tartrazina mediante Electro-oxidación: Optimización de las Condiciones de Operación," *Información tecnológica*, vol. 25, no. 4, pp. 163–174, 2014, doi: 10.4067/S0718-07642014000400018.
- [23] R. Andrés and O. Loaiza, "STUDY OF THE REMOVAL OF TARTRAZINE IN AN AQUEOUS MEDIUM USING A BENTONITE TYPE CLAY AS ADSORBENT MEDIA," 2019.
- [24] R. N. Agudelo-Valencia *et al.*, "Cavitación ultrasónica para el tratamiento de aguas residuales. Una Revisión," *Ingeniería y competitividad*, vol. 24, no. 2, 2022, doi: 10.25100/iyc.v24i2.11661.
- [25] Juan Alberto DOMINGUEZ MARTINEZ, "Cavitacion Hidrodinamica," *Anuario Ciencia en la UNAH*, Habana, pp. 1–34, 2018. Accessed: Aug. 23, 2023. [Online]. Available: <https://rcta.unah.edu.cu/index.php/ACUNAH/article/view/1008>
- [26] U. DE Posgrado De La Facultad De Ingeniería Química, P. DE Un Módulo De Ósmosis Inversa, and D. Gabriel Hurtado, "UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO ESCUELA DE POSGRADO "REMOCIÓN DE DUREZA MEDIANTE UN REACTOR DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA A PARTIR DE AGUA RESIDUAL."
- [27] F. Arias-Giraldo and S. Cardona-Naranjo, "Cavitación Hidrodinámica: un Enfoque desde la Ingeniería y la," *Agroindustria Scientia Et Technica*, vol. 24, no. 2, pp. 283–304, 2019, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84961237015>
- [28] A. Arango Ruiz, "Uso de electrocoagulación para la remoción de tartrazina en soluciones acuosas," *Producción + Limpia*, vol. 6, no. 2, pp. 58–68, 2011, Accessed: Aug. 04, 2023. [Online]. Available: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-04552011000200006&lng=en&nrm=iso&tlng=](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552011000200006&lng=en&nrm=iso&tlng=)
- [29] N. Modirshahla, M. Abdoli, M. A. Behnajady, and B. Vahid, "Decolourization of tartrazine from aqueous solutions by coupling electrocoagulation with ZnO photocatalyst," *Environment Protection Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 59–73, 2013, doi: 10.5277/EPE130105.

- [30] M. Pina-Soberanis, A. Martin-Dominguez, C.A. Gonzalez-Ramirez, F. Prieto-Garcia, A. Guevara-Lara, and J.E. Garcia-Espinoza, "Revision de variables de diseño y condiciones de operacion en la electrocoagulacion," Mexico , pp. 1–15, Apr. 13, 2011.
- [31] A. María Muñoz, M. Camilo, and A. V. Reyes, "APROPIACIÓN FUNCIONAL DE UNA CELDA DE ELECTROCOAGULACION CON ELECTRODOS DE HIERRO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTILERA."
- [32] Martha Mirella BERMEO GARAY, "Remocion eficiente de colorante refractario azul MNO reactivo en combinacion con vinil sulfonico en aguas residuales mediante tecnicas de electrocoagulacion y adsorcion," tesis , Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima , 2017.
- [33] D. Marcela *et al.*, "EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA ELECTROCOAGULACIÓN EN AGUAS RESIDUALES TEXTILES UTILIZANDO COMO ELECTRODO EL ALUMINIO."
- [34] A. DE Del Método Electrocoagulación Al Efluente De La Planta Piloto De Leche, L. Molina, D. Jefferson Velásquez Flores, and L. -Perú, "UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE CIENCIAS Tesis para Optar el Título Profesional de: INGENIERO AMBIENTAL," 2017.
- [35] M. G. Donoso Morcillo, "Eliminación de colorantes alimentarios en disolución acuosa mediante procesos químicos y electroquímicos de oxidación avanzada," Dec. 2016, Accessed: Jul. 24, 2023. [Online]. Available: <http://dehesa.unex.es/handle/10662/5173>

# ANEXOS

## Anexo 1: Matriz de consistencia

**Tabla 27**  
**Matriz de consistencia**

"DEGRADACION DEL COLORANTE TARTRAZINA MEDIANTE EL PROCESO INTEGRADO DE CAVITACION HIDRODINAMICA Y ELECTROCOAGULACION"						
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGIA
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	V. DEPENDIENTE			
¿En qué porcentaje se degradará el colorante tartrazina (E-102), por el proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación?	Determinar el porcentaje de degradación del colorante tartrazina (E-102), por el proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación.	Se logrará alcanzar la degradación del colorante tartrazina (E-102) entre 70- 95% mediante el proceso integrado de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación	Y = Degradación del colorante tartrazina	Degradación	% Porcentaje	Investigación de tipo Aplicada  Enfoque. Cuantitativo  Diseño: Experimental  Nivel: Explicativo.  Muestra: Solución sintética conteniendo Tartrazina  Unidad de análisis: Proceso integrado de la degradación del colorante Tartrazina
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS	V. INDEPENDIENTES			
¿Cuáles son los parámetros de operación del proceso de cavitación hidrodinámica para la degradación del colorante de tartrazina?	Evaluar los parámetros de operación más adecuados del proceso de cavitación hidrodinámica para la degradación del colorante de tartrazina.	Al seleccionar en forma adecuada la presión y concentración de tartrazina en el proceso de cavitación hidrodinámica se logrará una remoción del colorante entre 12% al 30%	X1: Parámetros de la cavitación hidrodinámica	Presión de alimentación  Concentración de tartrazina	35 Psi 50 Psi 70 Psi  2 ppm 8 ppm	
¿Cuáles son los parámetros de operación del proceso de electrocoagulación para la degradación del colorante de tartrazina?	Evaluar los parámetros de operación más adecuados del proceso de electrocoagulación para la degradación del colorante de tartrazina.	Al seleccionar en forma adecuada potencial eléctrico, concentración de tartrazina y NaCl en el proceso de electrocoagulación se logrará una remoción entre 60% al 65%.	X2: Parámetros de electrocoagulación	Potencial Eléctrico  Concentración de tartrazina  NaCl	7.7 V 9.2 V 11.2 V  2 ppm 8 ppm  0.25 g/l 0	

**Anexo 2: Fotografías de la Prueba experimental**

*Desarrollo de pruebas experimentales en el LOPU de la UNAC*



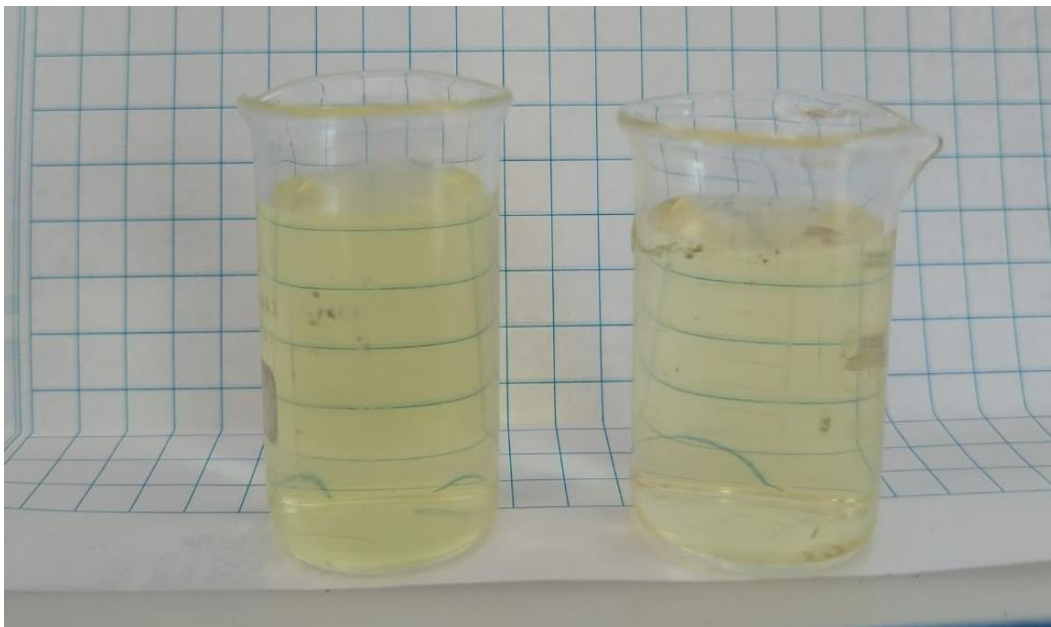
*Diversas muestras de los procesos de cavitación hidrodinámica y electrocoagulación*



*Lectura de las absorbancias de las muestras en el equipo de espectrofotómetro de rastreo SpectroQuest 2800 de UNICO*



*Muestra de la corrida experimental del proceso de cavitación hidrodinámica*





*Muestra de la corrida experimental del proceso de electrocoagulación*



**Figura 40**

*Muestras de las corridas experimentales del proceso integrado*



**Figura 41**

*Pruebas de pH y temperatura*

