



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE
HUANCVELICA**

(Creada por Ley N°. 25265)



ESCUELA DE POSGRADO

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO

TESIS

**SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN CON
ELECTRODOS MÓVILES PARA TRATAMIENTO
DE AGUAS ACIDAS MINERAS HUANCVELICA**

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

TECNOLOGÍA AMBIENTAL Y/O SANITARIA

PRESENTADO POR:

Bach. Johnny Ángel ESTEBAN CARHUAPOMA

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE INGENIERÍA**

MENCIÓN EN ECOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL

HUANCAVELICA, PERÚ

2022



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA
(Creado por Ley N° 25265)

ESCUELA DE POSGRADO

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERIA
UNIDAD DE POSGRADO



(APROBADO CON RESOLUCIÓN N° 736-2005-ANR)

"Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Huancavelica, a los veintisiete días del mes de diciembre, a horas 10:00 am, del año dos mil veintidós se reunieron los miembros del Jurado Evaluador, designado con Resolución N° 526-2022-EPG-R/UNH, de fecha 27 de abril del 2022, conformado de la siguiente manera:

PRESIDENTE : **Mg. Rodrigo HUAMAN JURADO**
<https://orcid.org/0000-0003-15993-8996>
DNI N°: 23260430

SECRETARIO : **Dr. Víctor Guillermo SANCHEZ ARAUJO**
<https://orcid.org/0000-0002-7702-0881>
DNI N°: 40446828

VOCAL : **M.Sc. José Luis CONTRERAS PACO**
<https://orcid.org/0000-0003-4591-3885>
DNI N°: 19916801

Con la finalidad de llevar a cabo el acto académico de sustentación de tesis Titulada "SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN CON ELECTRODOS MOVILES PARA TRATAMIENTO DE AGUAS ACIDAS MINERAS HUANCAMELICA" aprobado mediante resolución N° 1700 – 2022 – EPG-R/UNH, donde fija la hora y fecha para el mencionado acto.

Sustentante:
ESTEBAN CARHUAPOMA Johnny Ángel
DNI N°: 40945999

Luego de haber absuelto las preguntas que le fueron formuladas por los Miembros del Jurado conformado por los docentes: **Mg. Rodrigo HUAMAN JURADO, Dr. Víctor Guillermo SANCHEZ ARAUJO y M.Sc. José Luis CONTRERAS PACO**, se procede con la deliberación con el resultado de:

APROBADO

DESAPROBADO

POR: UNANIMIDAD

Para constancia se extiende la presente ACTA, en la ciudad de Huancavelica, a los veintisiete días del mes de diciembre del año 2022.

.....
Mg. Rodrigo HUAMAN JURADO
Presidente del Jurado.

.....
Dr. Víctor Guillermo SANCHEZ ARAUJO
Secretario del Jurado

.....
M.Sc. José Luis CONTRERAS PACO
Vocal del Jurado

Asesor

Dr. Nicasio Valencia Mamani

<https://orcid.org/0000-0002-9408-7770>

DNI N°: 01202271

Dedicatoria

A mis padres Vicente y Gloria por su apoyo inconmensurable quienes me han permitido llegar a cumplir una de mis metas más. A mis hermanos Richard, Miguel y Gustavo por su apoyo incondicional durante todo este proceso de formación. Finalmente, a mi hijo Gabriel y compañera de vida Mery que, con su infinito amor, acompañan mis sueños y logros que representan la razón de inspiración y existir. Siempre les llevare en lo absoluto y relativo de mis pensamientos.

Johnny Ángel

Resumen

Motivado por el estudio y análisis de las tecnologías emergentes verdes la investigación titulada; “Sistema de electrocoagulación con electrodos móviles para tratamiento de aguas acidas mineras”, se realizó con el objetivo de “Diseñar un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles para el tratamiento de aguas acidas mineras, Huancavelica”. Para el análisis y tratamiento de estas aguas acidas se diseñó un prototipo del tipo batch, compuestas por dos electrodos móviles (ánodo y cátodo) previstas al análisis de parámetros físicos y químicos para después compararlas con los límites máximos permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas (D.S. N° 010-2010-MINAM). La metodología utilizada tuvo un enfoque del tipo aplicado, a nivel explicativo, con un diseño de pretest y posttest con un solo grupo, sosteniendo como método específico el comparativo y como técnica; la observación experimental y como instrumento las fichas de registro. La muestra se compuso de 1 litro de relave minero, sosteniendo un muestreo no aleatorio del tipo intencional, mediante un análisis in situ con el equipo portátil multiparámetro SKU-IP67 y Wáter Quality Meter BEP-M310F. El diseño estadístico aplicado fue el DCA con arreglo factorial, que dispuso el control de los factores; tiempo, densidad de corriente eléctrica y velocidad angular. Los resultados mostraron estimaciones significativas de $p=0.007931$ y $p=2e^{-16}$ para el pH y ORP, que, al controlar los factores de efectos de interacción, se logró un incremento del 18.40% de H^+ , y 57.42% de mV respectivamente y una disminución significativa de $p=4.84e^{-5}$ y $p=2e^{-14}$ en la CE (5.07%, de $\mu S/cm$) y STD (19.30%, de mg/L), llegando a neutralizarlos acorde a los LPM de efluentes mineros-metalúrgicas.

Palabras clave: Electrocoagulación, Aguas acidas mineras, Electrodos móviles.

Abstract

Motivated by the study and analysis of emerging green technologies, the research entitled; "Design an electrocoagulation system with mobile electrodes for the treatment of acid mining drainage, Huancavelica", was carried out with the objective of "Designing an electrocoagulation system with mobile electrodes for the treatment of acidic mining waters, Huancavelica". For the analysis and treatment of these acidic waters, a prototype of the batch type was designed, composed of two mobile electrodes (anode and cathode) intended for the analysis of physical and chemical parameters to later compare them with the maximum permissible limits (LMP) for the discharge of liquid effluents from mining-metallurgical activities according to D.S. N°. 010-2010-MINAM. The methodology used had an approach of the applied type, at an explanatory level, with a pre-test and post-test design with a single group, holding the comparative as a specific method and as a technique; experimental observation and as an instrument the registration cards. The sample consisted of 1 liter of mining tailings, holding a non-random sampling of the intentional type, through an in situ analysis with the SKU-IP67 multiparameter portable equipment and the BEP-M310F Water Quality Meter. The statistical process was through a factor analysis by controlling the factors; time, electric current density and angular velocity. The results showed significant estimates in the physicochemical treatments of the acid mining drainage, that when controlling the factors of interaction effects in the pH and ORP, an increase of 18.40% of H⁺, and 57.42% of mV, respectively, and a decrease in the CE were achieved. (5.07%, of $\mu\text{S}/\text{cm}$) and STD (19.30%, of mg/L), neutralizing them according to the "LPM" of mining-metallurgical effluents.

Keywords: Electrocoagulation, Acid mining waters, Mobile electrodes.

Índice de contenido

Portada.....	i
Acta de sustentación.....	ii
Asesor.....	iii
Dedicatoria	iv
Resumen.....	v
Abstract	vi
Índice de figuras.....	ix
Índice de tablas.....	x
Índice de gráficos	xi
Introducción	xii
CAPÍTULO I.....	14
EL PROBLEMA	14
1.1. Planteamiento del problema.....	14
1.2. Formulación del problema.....	17
1.3. Objetivos.....	17
1.4. Justificación e importancia	18
CAPÍTULO II	20
MARCO TEÓRICO.....	20
2.1. Antecedentes de la investigación.....	20
2.2. Bases teóricas.....	41
2.3. Marco conceptual.....	64
2.4. Definición de términos.....	70
2.5. Formulación de hipótesis	73
2.6. Identificación de variables	74
2.7. Definición operativa de variables e indicadores	75
CAPÍTULO III.....	76
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	76
3.1. Tipo de la investigación.....	76
3.2. Nivel de investigación	76
3.3. Método de investigación.....	77
3.4. Diseño de investigación.....	77

3.5. Población, muestra y muestreo	78
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	79
3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	80
3.8. Descripción de la prueba de hipótesis.....	84
CAPÍTULO IV	85
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	85
4.1. Presentación e interpretación de datos	85
4.2. Discusión de resultados	91
4.3. Proceso de prueba de hipótesis	93
Conclusiones	120
Recomendaciones.....	121
Referencias bibliográficas	122
Anexos	129
Matriz de consistencia.....	130
Panel fotográfico	131
Reporte de resultados	136
Procesamiento de datos	137
Dimensiones del sistema de electrocoagulación	148
Maqueta de un sistema de electrocoagulación con electrodos de rotación	149
Gráfico de correspondencia de valores del agua respecto al pH y ORP	150
Tabla de valores del agua respecto al pH y ORP	151

Índice de figuras

Figura 1 Formación de un DAM.....	48
Figura 2 Etapas en la formación de aguas àcidas.....	50
Figura 3 Mecanismos en el proceso de electrocoagulación.....	53
Figura 4 Procesos involucrados en el sistema de electrocoagulación.....	54
Figura 5 Configuración bipolar conectado en paralelo.....	57
Figura 6 Mapa de ubicación de la zona de estudio	86

Índice de tablas

Tabla 1 Clasificación de un DAM en base al pH.....	43
Tabla 2 Clasificación de un DAM en base a especies minerales	44
Tabla 3 Tipos de un DAM	47
Tabla 4 Clasificación de un DAM.....	51
Tabla 5 Porcentaje de remoción según material y tipo de flujo	58
Tabla 6 Condiciones iniciales de los parámetros de estudio del DAM.....	87
Tabla 8 Descriptivos del parámetro pH	88
Tabla 9 Descriptivos de parámetro ORP.....	89
Tabla 10 Descriptivos del parámetro CE	89
Tabla 11 Descriptivos del parámetro STD	90
Tabla 12 ANVA de 3 factores del pH, ORP, CE y STD	98
Tabla 13 ANVA de 3 factores del pH	100
Tabla 14 ANVA de 3 factores del ORP	105
Tabla 15 ANVA de 3 factores del CE.....	110
Tabla 16 ANVA de 3 factores del STD	115

Índice de gráficos

Gráfico 1 Contaminante removido según el material y tipo de flujo	58
Gráfico 2 Comportamiento lineal del pH respecto su media	88
Gráfico 3 Comportamiento lineal del ORP respecto su media	89
Gráfico 4 Comportamiento lineal del CE respecto su media	90
Gráfico 5 Comportamiento lineal del STD respecto su media.....	91
Gráfico 6 Normalidad de datos del pH.....	94
Gráfico 7 Normalidad de datos del ORP	95
Gráfico 8 Normalidad de datos de la CE.....	96
Gráfico 9 Normalidad de datos de los STD	97
Gráfico 10 Efectos principales del pH	101
Gráfico 11 Interacción densidad vs tiempo del pH.....	101
Gráfico 12 Interacción densidad vs velocidad angular del pH.....	102
Gráfico 13 Interacción velocidad angular vs tiempo del pH.....	102
Gráfico 14 Efectos principales del ORP	106
Gráfico 15 Interacción de densidad y tiempo del ORP.....	106
Gráfico 16 Interacción de la densidad y velocidad angular del ORP.....	107
Gráfico 17 Interacción la velocidad angular y tiempo del ORP	107
Gráfico 18 Efectos principales de la CE	111
Gráfico 19 Interacción de la densidad y tiempo de la CE.....	111
Gráfico 20 Interacción de la densidad y velocidad angular de la CE	112
Gráfico 21 Interacción de la velocidad angular y tiempo de la CE.....	112
Gráfico 22 Efectos principales de los STD	116
Gráfico 23 Interacción de la densidad y tiempo de los STD.....	116
Gráfico 24 Interacción de la densidad y velocidad angular de los STD	117
Gráfico 25 Interacción velocidad angular y tiempo de los STD.....	117

Introducción

El agua representa un tema crucial y sensible, tanto como para las urbes y en lo fundamental para las zonas rurales (centros poblados), debido a que este recurso está siendo utilizado indiscriminadamente por las diversas actividades productivas que desarrolla el hombre y una notable ausencia en su tratamiento respectivo.

Un factor principal dentro de las comunidades campesinas es el impacto previsto por las actividades mineras que, enfocados en sus aguas (lagunas nacientes) son afectadas los diversos ecosistemas y por ende la salud de la población producto de la minería. El criterio base de la investigación está centrada en el uso y manejo de tecnologías emergentes del tipo verde como es el caso de la técnica de electrocoagulación que tiene como eje fundamental el tratamiento de aguas acidas mineras mediante la utilización de electrodos móviles como una alternativa tanto económica y la reducción de los procesos unitarios en una planta de tratamiento. El proyecto Pukaqaqa comprende los límites territoriales entre los distritos de Huando-Ascensión, situado en los centros poblados de Pueblo Libre, Palca y Pachachaca, ubicado a 12 km Nor Oeste de la ciudad de Huancavelica, a unos 4200 msnm con una producción de 30000 T/d de concentrado de bulk Cu y Mo. El proyecto contempla un depósito de relave minero y uno de desmonte ubicado la subcuenca de Machaypampa con una vida útil de 16 años a partir de julio del 2012 con producciones de relaves espesados de 128 Mt (8Mm³/año). La utilidad de agua de uso industrial provenientes de las sub cuencas tienen una demanda útil de 10.3 L/s producto de los flujos superficiales ácidos de los drenajes de tajo abierto de mina. Para el tratamiento de estas aguas acidas, el tipo de tecnología no considera ser del todo conveniente (neutralización con cal), debido a consideraciones en gran cantidad y costos muy elevados, con producciones de grandes cantidades de lodos y metales pesados (tratamiento con bacterias reductoras de sulfatos). Otro factor observable deficiente está en el mantenimiento y operación de estos embalses. De acuerdo a las situaciones planteadas, el objetivo de la investigación estima por conveniente diseñar un sistema de tratamiento para drenajes ácidos mineros (DAM), aplicando métodos electroquímicos (electrocoagulación - electroflotación) que a diferencia del convencional que trabaja con los electrodos estáticos (batch), con conexiones entre electrodos de forma paralela o en serie mediante placas metálicas de

aluminio y Hierro por lo general, este diseño “sistema electrocoagulación con electrodos móviles” también del tipo batch, recurre a variantes que enfoca como eje central el movimiento de los electrodos (velocidad angular) que durante el proceso de tratamiento acopla dos electrodos de aluminio, instalados de forma paralela que interactúan con el volumen de la muestra del DAM a través de factores de interacción (tiempo, densidad eléctrica y velocidad circular) busca desestabilizar metales pesados (coloides) mediante la coagulación eléctrica (desgaste de electrodos, ánodo y cátodo), en el tratamiento de parámetros básicos del pH, ORP, Conductividad Eléctrica y Solidos Totales Disueltos que en su finalidad primordial busca tratar el aumento o disminución de estos cuatro parámetros motivo de estudio, de acuerdo a los Límites Máximos Permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

Nuestra sociedad afronta la que tal vez perciba una de las mayores problemáticas del mundo; la necesidad de suministrar agua para una dinámica sociedad creciente a nivel mundial. Esta necesidad se amplifica en el día a día e intuye el desafío de investigar y adaptar nuevas tecnologías que permitan la protección, conservación y recuperación de nuestros recursos hídricos, cuya calidad y condición se ha deteriorado por la descarga de residuos peligrosos, como es el caso de los drenajes ácidos de minas (DAM), que ocasiona graves problemas ambientales debido al alto potencial de sulfatos y metales pesados presentes en efluentes hídricos superficiales y subterráneos.

En Perú, el DAM representa uno de los mayores problemas ambientales, producto de las explotaciones mineras y su consumo hidroenergético a gran escala, específicamente en las regiones alto andinas. Entre las características esenciales que presentan los DAM se especifica de acuerdo a los bajos valores del pH, elevadas concentraciones de iones sulfato e iones metálicos de Ag, Cu y Zn primordialmente. La remoción de iones de sulfato representa el mayor desafío técnico en el tratamiento de efluentes mineros debido a su alta

solubilidad con el agua que a comparación a los demás iones metálicos (Candorin, Carissimi, y Rubio, 2007, p. 849).

El pH es el potencial de hidrogeno. Parámetro de mucha importancia que mide la acidez o alcalinidad en un sin número de procesos bioquímicos de una disolución acuosa. Este proceso ha generado gran relevancia para el agua que drena de un asiento minero en el control de contaminantes, como es el caso de la neutralización de desechos que generan la acidificación del agua. El control del pH es en general difícil de realizar debido a la dependencia altamente no lineal ($\text{pH} = -\log\text{H}^+$) entre los reactivos que ingresan al sistema y el pH que se establece (Wilson, 2004, p. 86).

De acuerdo al Ministerio de Energía y Minas (MINEM), presenta el Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM, límites máximos permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicos, actualmente vigente, que norma los criterios básicos de control de las descargas de aguas residuales de origen minero a cuerpos receptores como ríos, riachuelos, lagos y entre otros. Estas actividades mineras o actividades conexas conforme a la disposición de esta norma, estarán sujetas al protocolo de monitoreo de aguas y efluentes (ente fiscalizador) y en caso de una infracción ambiental relacionada a los LMP será remitidas al MINEM para su respectiva sanción.

La utilidad de tecnologías para el tratamiento de aguas contaminadas es variada. Los procesos fisicoquímicos y biológicos son los más usados en el país, el primero utiliza coagulantes químicos orgánicos e inorgánicos, polímeros naturales, sintéticos y membranas (osmosis inversa) para la remoción de los contaminantes, mientras que el tratamiento biológico depende de microorganismos, por lo general las bacterias, las cuales son muy sensibles y necesitan condiciones óptimas para obtener una buena eficiencia (Aguilar, 2015, p. 70).

Las tecnologías, como los procesos de electrocoagulación, electroflotación y electrodecantación son considerados como tecnologías verdes (limpias emergentes) que se presentan como alternativas para el tratamiento de las aguas residuales y prometen ventajas competitivas frente a las tecnologías tradicionales (Rajeshwar, 1997). Desde principios de siglo XX, se han realizado

diversas investigaciones en base a estas tecnologías y se ha comprobado que alcanza buenos rendimientos en la neutralización del pH y en la eliminación de metales pesados (en particular sulfuros). Además, requieren poco mantenimiento, son de fácil operación y su bajo costo puede ser asumido durante largos períodos de tiempo, donde el objetivo principal en todos ellos es la neutralización de la acidez y la precipitación de los metales lixiviados. A tal efecto que actúan cambiando las condiciones de ORP (potencial redox) y pH, de forma que se favorezca la formación de especies insolubles que precipiten y retengan la carga contaminante.

El presente trabajo de investigación se enfocó en el tratamiento y análisis de los DAM de la mina Milpo, ubicado al sur oeste de la ciudad de Huancavelica, comprendido entre las microcuencas Machaypampa y Callqui, discurriendo sus aguas en la sub cuenca Ichu. El aprovechamiento de este recurso comprende; los sistemas hidrológicos naturales y funcionales, delimitado por una divisoria de aguas, cuyos elementos como: los sistemas ecológicos, hídricos, humedales, vegetaciones y sistemas productivos antrópicos están siendo contaminadas y degradadas, llegando al límite de una carencia de cobertura vegetal. Por otro lado, durante la perforación se cruzará con acuíferos, que alterará la calidad del agua subterránea, ello contaminará la captación de agua de Callqui que ingresa a la planta de tratamiento de la EPS EMAPA, ello incrementará el porcentaje de arsénico, plomo, mercurio, y estas no podrán ser removidos totalmente, y tendrá que cerrar la captación Callqui, perjudicando a la población huancavelicana. Motivado por esta situación se contempla la necesidad de recurrir a esta tecnología de electrocoagulación móvil, que efectuara la depuración de metales pesados y la neutralización de los parámetros del pH, ORP, STD (sólidos totales disueltos), conductividad eléctrica (CE), motivo de estudio de la presente investigación de modo que permita la conservación y recuperación de estas aguas y se disponga su reuso o descarga sin ocasionar daños al medio ambiente. Los resultados proporcionaran elementos de juicio para mejorar la utilidad de estos recursos hídricos en base a las normas vigentes del país.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿El diseño de un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el tratamiento de aguas acidas mineras?

1.2.2. Problemas específicos

- a. ¿El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles modifica eficazmente el pH en el tratamiento de aguas acidas mineras?
- b. ¿El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles modifica eficazmente del ORP en el tratamiento de aguas acidas mineras?
- c. ¿El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles modifica eficazmente la CE en el tratamiento de aguas acidas mineras?
- d. ¿El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles modifica eficazmente los STD en el tratamiento de aguas acidas mineras?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles para el tratamiento de aguas acidas mineras.

1.3.2. Objetivos específicos

- a. Estimar la eficiencia del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en el control del pH en el tratamiento de aguas acidas mineras.
- b. Estimar la eficiencia del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en el control del ORP en el tratamiento de aguas acidas mineras.
- c. Estimar la eficiencia del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en el control de la CE en el tratamiento de aguas acidas mineras.

- d. Estimar la eficiencia del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en el control de los STD en el tratamiento de aguas acidas mineras.

1.4. Justificación e importancia

La investigación se centró bajo el enfoque de la gestión sostenible del agua, con el objetivo de diseñar un prototipo (sistema de electrocoagulación) como una alternativa tecnológica para el tratamiento de aguas acidas mineras. La electrocoagulación, una tecnología conocida desde principios del siglo XX, ha evolucionado, siendo eficazmente aplicada en la actualidad para el tratamiento, de diversas aguas. Desde esta perspectiva y la escasa aceptación pública de la minería en su conjunto, se propone insertar este prototipo emergente con su variante (electrodos móviles), para generar un medio ambiente limpio y seguro, con la finalidad de optimizar positivamente el balance de aguas de operaciones mineras. Las operaciones de tratamiento más común de aguas de minas activas utilizadas en todo el mundo es el tratamiento basado en el uso de cal, coagulantes químicos como; CaO (Oxido de Calcio) y Na_2CO_3 (Carbonato Sódico) y Na_2S (Sulfuro de Sodio), polímeros naturales y/o sintéticos (latex, policloruro de aluminio) y, así como algunas sales de fierro y de no emplear la dosis óptima de estos coagulantes o polímeros, producirá una sobredosificación de estos productos y su uso indiscriminado puede disminuir o incrementar la concentración (oxidación) del pH en el agua tratada y generar una excesiva cantidad de lodos inestables y encarecer su tratamiento. Los lodos generados por electrocoagulación retienen menos agua y son más estables y se pueden separar rápidamente mediante el proceso de filtración por lo que desarrollara el 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. Se trata de un prototipo compacto que opera en continuo, mediante un reactor de especial diseño donde se hallan las placas o electrodos metálicos para producir la electrocoagulación. Este sistema requiere de un equipamiento sencillo y es muy fácil de manipular, debido al fácil acoplamiento

de coagulantes eléctricos en su sistema y garantiza un costo mínimo en su limpieza y/o mantenimiento. Es por ello que se considera como una técnica innovadora para ser aplicado en la neutralización de aguas acidas mineras, logrando así el cumplimiento de la normativa ambiental vigente en el país LMP (Límites Máximos Permisibles). Esta investigación fomentara a mejorar su índice de uso de agua y a llegar a ser menos dependiente de fuentes externas, para así formar un pilar esencial para el desarrollo sostenible, alcanzando el reto de proteger, conservar y recuperar el recurso hídrico del centro poblado de Milpo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Camacho et al. (2021) publicaron en Colombia el artículo “Evaluación de la reducción de la concentración de cefalexina en solución acuosa por electrocoagulación con electrodos de grafito a diferentes valores de pH inicial e intensidad de corriente aplicada”, con el objetivo de “Evaluar la reducción de la concentración de cefalexina (CEF), en solución acuosa por medio de electrocoagulación (EC) con electrodos de grafito como alternativa de eliminación de este contaminante en las aguas residuales”. En primer lugar, se ajustó la conductividad eléctrica del agua con NaCl, lo que permitió la formación de especies de cloro activo (HOCl y OCl⁻). Se emplearon electrodos de grafito debido a sus características frente al desgaste del ánodo, que ocurre con los sistemas en los cuales se emplean ánodos metálicos. Se analizó el efecto del pH inicial de la solución (7 y 8) y la intensidad de corriente aplicada (1 A y 1,5 A). Para evaluar el efecto de estas variables, se implementó un diseño experimental de tipo central compuesto y la metodología de superficie de respuesta.

Adicionalmente, se determinó las condiciones de las variables de estudio las cuales permiten alcanzar la mayor efectividad del proceso. Se determinó que a un nivel de pH 7 y una intensidad de 1,5 A se alcanza una remoción del 75,5 % en la concentración de cefalexina. Para un pH 8 se observa una considerable disminución del porcentaje de reducción de concentración de cefalexina, esta situación implica que la variable que presenta mayor influencia sobre la variable de respuesta es el pH de la solución acuosa.

Rojas, Penedo, Ojeda y Riveron (2020) publicaron en Cuba un artículo sobre la “Remoción de níquel por electrocoagulación del sistema Ni(II)-NH₃-CO₂-SO₂-H₂O con electrodos de aluminio”, con el objetivo de “Remover níquel por electrocoagulación del sistema Ni(II)-NH₃-CO₂-SO₂-H₂O, contenido en el licor efluente del sedimentador de carbonato básico de níquel de la planta productora de níquel por la Tecnología de Lixiviación Carbonato Amoniacal, en Punta Gorda, Cuba”. Se realizó un diseño experimental completo, con un nivel central y 3 réplicas; y los factores densidad de corriente, pH, temperatura y tiempo de electrólisis. La concentración inicial de níquel fue de 660 mg/L; el volumen de licor, 500 mL, el par de electrodos Al/Al, separados 10 mm, con un área efectiva de $4,6 \times 10^{-3}$ m². Las condiciones más favorables se lograron a 9,8 mA/cm², 60° C, pH = 8,65 y 40 min de electrólisis, para una remoción de un 95%, consumo específico de energía y costo de operación de 5,41 kW-h/kg Al y 712 \$/t Ni respectivamente.

Bermudez y Salazar (2019) realizaron en la Universidad de Guayaquil, Ecuador la tesis sobre la “Aplicación de fotocátalisis heterogénea y electrocoagulación en depuración de cromo y cadmio en agua residual proveniente de una industria metalmecánica”, con el objetivo de “Reducir los contaminantes Cadmio y Cromo hasta los límites permisibles estipulados en la normativa ecuatoriana de descargas de efluentes a alcantarillado”. La investigación llevo la perspectiva

metodológica cuantitativa del tipo experimental. Se realizó a escala de laboratorio con un diseño de dos prototipos de reactores para ambos procesos, uno del tipo batch con capacidad de 6 litros, el otro reactor con sistema de recirculación al mismo volumen con 10 placas bipolares de hierro, conectándose a un sistema de radiación UV artificial central por medio de una lámpara de cuarzo, con cubierta concéntrica de PVC, se trabajó con placas de hierro para un volumen de 6 litros de agua cruda con un pH de 4.58, voltajes, (15, 18, 20), intensidad de corriente variada según voltaje (Amperios), y tiempos de trabajos (3, 4 y 5 minutos), añadiendo en fotocátalisis UV, Oxido de titanio (TiO_2), H_2O_2 (Peróxido de hidrogeno). Obteniendo así la reducción de cromo hexavalente en un 99.7% y cadmio 99.5% en 15 V y 4.5 A durante 5 minutos en temperatura ambiente.

Piedra y Zambrano (2019), realizaron en la Universidad de Guayaquil, Ecuador la tesis sobre la “Aplicación de electroquímica en la remoción de contaminantes presentes en aguas residuales generadas de una planta procesadora de material minero”, con el objetivo de “Aplicar electroquímica en la remoción de contaminante presentes en aguas residuales generadas de una planta procesadora de material minero”. La investigación contempla el método hipotético-inductivo basado en un diseño del tipo experimental. La elaboración de este procedimiento se realizó en tres etapas usando un reactor discontinuo tipo batch de 1 L, en la primera etapa determino las mejores condiciones de trabajo probando diferentes configuraciones, utilizando electrodos de hierro y aluminio en arreglos de celda de 3x2 y 2x3, con una tensión de 14 V a 20 V, a intensidades de corriente eléctrica a intervalos de 2 A a 6 A y rangos de tiempos de 1 a 4 minutos. En consecuencia, se determinó utilizar electrodos de aluminio colocados en una configuración de 3x2, conectados a una tensión de 20,4 V y una intensidad de 6A en un tiempo de retención de 2 minutos logrando alcanzar porcentajes de remoción de hierro (Fe), manganeso (Mn), color y turbiedad (UNT), dando como

resultado 98.95 %, 94.23 %, 97.18 % y 96,64 % respectivamente. Se concluyo en cumplir con los límites máximos permisibles (LMP) del Acuerdo Ministerial 97/A de descarga de efluentes para un cuerpo de agua dulce en relación a Fe y Mn.

Hernández (2019) realizo en la Universidad de América Bogotá, Colombia la tesis sobre la “Evaluación del sistema de electrocoagulación para disminuir la carga contaminante a escala de laboratorio”, con el objetivo de “Evaluar el uso del proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la empresa procesadora de materias primas (PMP)”. La investigación mantiene un enfoque explicativo a escala de laboratorio para una capacidad de 1 L con 6 electrodos (aluminio y hierro) con dimensiones de 0,08 m x 0,08 m x 0.16 ml. El agua en tratamiento presento altas concentraciones de grasas y aceites (1 264 mg/l), sólidos totales suspendidos (17 814 mg/l), sólidos sedimentables (24 007 mg/l), DQO (85 229 mg/l) y DBO₅ (12 308 mg/l). El diagnóstico definió los factores de análisis: pH, densidad de corriente, temperatura, electrodos y tiempo de reacción. Se realizó tres pruebas, la prueba preliminar evaluó la técnica de electrocoagulación en tiempos de retención de 15 y 60 minutos a una intensidad de corriente eléctrica de 2V, dando resultados no esperados. La primera experimentación se vinculó a tiempos de 1 a 6 horas, con 2 V y electrodos de hierro (Fe) y aluminio (Al), dando una efectividad en 4 horas obteniendo una remoción mayor al 80 %. El segundo proceso de experimentación se analizó utilizando electrodos de Fe, trabajando a voltajes de 2,7 V, 7,7 V y 12,6 V e interactuando en tiempos de 5, 15 y 30 minutos, se obtuvo una eficiencia del 90 % de remoción de contaminantes para un voltaje de 12,6 V y 30 minutos de retención.

López y Vargas (2018) realizaron en la Universidad el Bosque, Bogota, Colombia la tesis sobre la “Evaluación de la eficiencia de remoción de Ag⁺, Ni (II) y Cu (II) de aguas residuales del sector galvánico mediante

electrocoagulación”, con el objetivo de “Evaluar la eficiencia de remoción de Ag^+ , Ni (II) y Cu (II) presentes en las aguas residuales de la empresa Soluciones Metálicas y Derivados S.A.S empleando la electrocoagulación”. La investigación tuvo un alcance descriptivo donde se busco implementar un sistema de tratamiento eficiente para la remoción de metales. La técnica seleccionada se describio como electrocoagulación (EC), a través de ella se evaluo la eficiencia de remoción de Ag^+ , Ni (II) y Cu (II) presentes en el agua residual. Para ello se analizo las concentraciones de cada metal y se diseño una celda de capacidad de 3,6 L, el cual opero en 5 ensayos con especificaciones diferentes de densidad de corriente, tiempo de tratamiento y pH. Las concentraciones metálicas obtenidas luego del tratamiento se comparan con las del agua inicial, obteniendo mayores índices de remoción al aplicar una densidad de corriente entre $37,11 \text{ A/m}^2$ a $46,38 \text{ A/m}^2$ en un tiempo de tratamiento de 30 minutos y pH ácido de $6,36 \text{ H}^+$. La eficiencia de remoción alcanzada fue de Ag^+ en (88,0 %), Ni (II) en (88,0 %) y Cu (II) en (96,0 %). La implementacion de esta tecnica permitio concluir como un sistema, eficiente y económico en la remocion de metales.

Forero (2018) publico en Colombia el articulo sobre la “Electrocoagulación para la desalinización del agua de mar”, la presente investigación, con el objetivo de “Evaluar los parámetros fisicoquímicos de una muestra de agua de mar antes y después de tratamiento con electrocoagulación, con el fin de determinar los cambios en los parámetros fisicoquímicos, los cuales fueron”: turbiedad de 4.84 a 38.3 UNT, oxigeno disuelto de 65.0 a 3.39 mg/L, pH de 8.06 a 9.23, conductividad de 3.26 a 789.3 $\mu\text{s/cm}$. Despues al proceso de tratamiento, se seca la muestra de agua de mar para pesar en una balanza analítica. La cantidad de sal separada de la muestra, obtenida es 80 gramos.

Blass y Panamá (2017) publicaron en Mexico el articulo sobre la “Aplicación de electrocoagulación para eliminación de silicio en agua de

enfriamiento”, con el objetivo de “Aplicar la electrocoagulación como una tecnología alternativa para la eliminación de sílice y otros contaminantes en agua proveniente de la purga de torre de enfriamiento de una central termoeléctrica y su acondicionamiento para su reutilización haciendo uso de procedimientos de coagulación químicos tradicionales”. Se realizaron pruebas químicas para determinar las mejores dosis de hierro que se generarían posteriormente en la celda de electrocoagulación. Se probaron dosis de hierro en el intervalo de 10 a 60 mg/l. Se utilizó un programa para calcular la corriente necesaria para generar hierro en la celda de tal forma que se tuvieran las concentraciones deseadas. Los resultados obtenidos en la eliminación de silicio bajo diferentes condiciones mostraron que con la simple adición del poli electrolito catiónico al efluente de la celda de electrocoagulación, el contenido residual de silicio en el agua disminuye a niveles que permiten su reciclaje, por lo que se considera, bajo las condiciones a las que se llevaron a cabo los experimentos y para este tipo de agua, que el proceso propuesto es favorable, y que es viable de aplicar ya que no requiere de la adición de otro reactivo que haría el proceso más caro.

Ruiz (2017) realizó en Bogotá, Colombia la tesis doctoral “Prototipo de una celda de electrocoagulación abastecida con energía fotovoltaica para tratamiento de aguas residuales en la industria minera”, con el objetivo de “Desarrollar un prototipo a escala de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de las minas de carbón en el municipio de Cucunubá, Cundinamarca”. La investigación se enmarca en la caracterización de aguas residuales tomadas de las minas de carbón, las cuales son procedentes de los drenajes cotidianos y de actividades productivas. El proceso experimental con el prototipo, contrasta la caracterización del agua sin tratar con la caracterización del agua procesada en la celda de electrocoagulación, en el cual concluyó; que en un tiempo de 15 minutos a una potencia de 5 Watts es suficiente para que la electrocoagulación resulte ser un proceso eficaz. Para tal fin, es posible

la utilización de paneles solares que generen la energía fotovoltaica necesaria para el funcionamiento de la celda electrocoaguladora al procesar un litro de agua residual. El uso del proceso de esta tecnología que aprovecha las energías alternativas como la solar es una contribución a la reducción de la huella ambiental ocasionada por la producción minera, para este caso, los metales pesados que contienen las aguas residuales de la mina de carbón pueden llegar a contaminar el agua de las fuentes hídricas que abastecen al municipio, lo que puede llegar a desencadenar problemáticas de salud pública y/o modificaciones en los ecosistemas de la región.

Ferniza (2017) realizó en la Universidad Autónoma de México la tesis de maestría sobre la “Eficiencia de un sistema acoplado electrocoagulación-fitorremediación para la remoción de Pb, Cu, Cd y Zn, presentes en efluentes mineros”, con el objetivo de “Poner en práctica y evaluar la eficiencia de un sistema acoplado de Electrocoagulación y Fitorremediación (EF), para la remoción de metales pesados, con el fin de contribuir en la reducción del impacto ambiental y la salud de la localidad aledaña a la zona”. Se trata de una investigación en la preparación de una muestra sintética con las concentraciones de metales (Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , y Zn^{2+}). Se partió de la elaboración de una solución acuosa idéntica en concentraciones a la del agua residual minera. Posteriormente fue sometida a tratamiento electroquímico “electrocoagulación” mediante un reactor en batch con 10 electrodos de aluminio, 5 como cátodos y 5 como ánodos. Al finalizar este tratamiento se obtuvieron porcentajes de remoción de 100 % Zn, 98,3 % Cu, 78,7 % Cd y 96,9 % Pb; con un consumo de energía de 26 Kwh/m³. Para el tratamiento de fitorremediación fue seleccionada la macrófita *Typha latifolia* L., y se probaron diluciones de 12.5, 25, 50, 75 y 100 %, sin embargo, las plantas tuvieron procesos de fitotoxicidad en las diluciones de 50 a 100 % del agua electrocoagulada. Siendo la dilución al 12,5 % la concentración a la cual los biomarcadores como la relación clorofila a/b

y la tasa de crecimiento relativo, donde no se presentaron efectos tóxicos en la planta. Finalmente, los resultados obtenidos del tratamiento acoplado nos indican una remoción del 99,2 % Cu, 81,3 % Cd y 99,4 % Pb; en el caso del Zn se presentó incremento en su concentración debido a desorción de la planta. La combinación de procesos electroquímicos y fitorremediación es factible en el tratamiento de aguas residuales que contienen los metales probados en este estudio.

Zhenlian, Shijie, y Nanqi (2017) publicaron en Harbin, China el artículo sobre la “Electrocoagulación inalámbrica en tratamiento de agua basada en electroquímica bipolar”. La investigación reporta a la electrocoagulación inalámbrica (ECI) basada en la electroquímica bipolar donde las láminas de hierro (Fe) se utilizaron como electrodos bipolares de sacrificio (EBS) y dos placas de grafito (C) como electrodos impulsores. Estos impulsores interactúan por una diferencia de potencial interfacial inducida por el campo eléctrico en solución, la disolución del Fe se inició en el polo anódico, logrando la formación de coagulante de Fe y, por ello, la eliminación de la turbiedad. Se halló que la concentración total de Fe producida dependía más de la configuración geométrica del EBS que de los parámetros electroquímicos. Es decir, colocar el EBS con una longitud en paralelo al campo eléctrico podría generar una concentración de Fe de un 84,6 % más alta que cuando se coloca verticalmente. Así mismo, el incremento del número de EBS de uno a tres transfirió a un incremento de la producción de coagulante en 2,1 veces. Igualmente, para extender la caída de voltaje y minimizar el material utilizado, el EBS se diseñó en diferentes formas geométricas. El EBS “en forma de H” podría alcanzar casi la misma concentración de Fe que el EBS sin modificar, incluso el área de superficie relativa cátodo e ánodo era tan baja como 0,36. Lo cual representó una producción de coagulante eficientemente al ahorrar hasta un 40 % del material y el costo del electrodo. La operación inalámbrica por sí sola no puede resolver los problemas causados por la conexión del electrodo, sino que también

permitio que el número arbitrario de EBS sacrificables trabajen simultáneamente en una configuración muy simple. Además, el rendimiento de ECI se puede controlar fácilmente mediante la configuración geométrica del EBS. Se concibió que todos estos factores hagan que el proceso de electrocoagulación sea mucho más fácil, más económico y más confiable en el tratamiento del agua.

Durante (2016) realizó en la Universidad de Córdoba la tesis de maestría “Tratamiento por electrocoagulación de aguas de cianuración generadas en el beneficio del oro en una zona minera del sur de Bolívar, Colombia”, con el objetivo de “Evaluar la remoción de cianuro (CN^-) presente en aguas residuales generadas en el proceso de neutralización a pulpa de cianuración provenientes de una zona de minera aurífera”. Se realizó bajo condiciones controladas de un diseño experimental, aplicando la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) para evaluar los efectos simples y combinados de tres (3) variables independientes (distancia entre electrodos, TRH y pH) en la eficiencia de remoción de CN^- y la optimización de las condiciones de manipulación. La máxima remoción de CN^- predicha (79,5 %) por el sistema fue encontrada para distancia entre electrodos (DE) de 2,7 cm, TRH = 300,6 s y pH = 10,99. La validación del modelo se llevó a cabo bajo las condiciones: DE = 2,7 cm, t = 300 s y pH = 11, que se acercan a la máxima eficiencia con un porcentaje de remoción de 74,9 %.

García, Ubaque y De Plaza (2016) publicaron en Bogotá, Colombia el artículo “Estudio exploratorio del tratamiento de agua de lavado de tintas por método de electrocoagulación/electroflotación”. La investigación es de alcance exploratorio debido a la carencia de aplicación industrial. Se utilizaron electrodos de aluminio, de 16 cm de alto, 4 cm de ancho y 2 mm de grosor, con un área sumergida total de 32 cm² tanto para el cátodo como para el ánodo. Se usó un solo par de electrodos para cada corrida, conservando una distancia de 0,7 cm entre ellos. El voltaje del circuito

se fijó en +5V con una corriente de 5 A. El tiempo activo del diseño experimental fue de 30 min y 15 min y el punto central fue de 22,5 minutos. Se aplicó un diseño experimental 2^2 con un punto central. Se obtuvo un rango de porcentajes de remoción de DQO entre 10,43 % hasta 50,93 %. No obstante, los resultados evidencian la posibilidad de que la descontaminación por electrocoagulación puede ser reversible, y no se observa la incidencia esperada de los factores escogidos.

Jaramillo, Jaramillo y Taborda (2015) publicaron en Caldas, Colombia el artículo “Construcción de un reactor electroquímico para electrocoagulación como método alternativo en la descontaminación de aguas residuales” con el objetivo de “Diseñar de una planta a escala laboratorio de un reactor electrolítico que permita, analizar y tratar muestras de aguas residuales de diferentes industrias por el método de electrocoagulación”. El estudio experimental de los parámetros se basó en 2 tipos de reactores: Primero fue un tanque de electrocoagulación para sistema estático, este reactor maneja un flujo constante de 6 litros, el cual consta de cuatro pares de electrodos dispuestos verticalmente en el reactor con una separación entre ellos de 1 cm. Las dimensiones de cada electrodo fueron 20 x 26,5 cm y 1 mm de espesor. El electrodo de aluminio actuó como ánodo y el de acero como cátodo. En segunda medida, se procedió a fabricar un reactor con flujo dinámico con dimensiones del tanque son 30,9 cm de alto, 17,0 cm de ancho y 35,7 cm de largo. La sección A mide 4,1 cm, la sección B mide 3,2 cm, la sección C 5,0 cm, la sección D 13,9 cm y la sección E 16,9 cm. El reactor fue construido en acrílico y con una capacidad de 8,5 L de operación. El sistema consta de cuatro compartimentos situados en continuo y haciendo una rampa con un ángulo de 20 grados. Los primeros tres compartimentos están equipados cada uno con un cartucho de cuatro electrodos, un par de electrodos de aluminio (ánodo) y acero (cátodo), con una separación entre ellos de 1 cm. El espesor de los electrodos es de 1 mm, con un área activa de 205,75 cm². Los resultados fueron en

mostraron una efectividad por su alta remoción de metales, (principalmente un 90% de Fe, Mg y Zn) y materia orgánica (aproximadamente 80% de remoción según DQO). Se concluyó que se obtuvo una correlación entre la densidad de corriente eléctrica y la distancia inter-electrolítica frente a la remoción de contaminantes, mostrando mayor eficacia a densidades de corrientes altas y distancias cortas de separación entre electrodos.

Diaz, Escobar, y Antonio (2014) realizaron en Medellín, Colombia la tesis “Tratamiento de aguas residuales de origen químico mediante electrocoagulación”, con el objetivo de “Evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes (DQO, SST y Turbiedad) presentes en el agua residual de un laboratorio de análisis químicos”. Los ensayos de electrocoagulación se hicieron por partes, en una celda de 1,4 litros equipadas con 2 electrodos (uno de hierro y otro de aluminio). Los electrodos estaban dispuestos paralelamente y conectados a una fuente de voltaje con control, para corrientes desde 0,0 a 1,5 Amperios, logrando eficiencias de remoción de DQO superior al 60% en los ensayos con electrodos separados a 1,0 y 4,0 cm, independiente del voltaje aplicado. No obstante, la eficiencia en la remoción de los SST y la turbiedad no fue adecuada, en algunos ensayos la muestra tratada tenía mayor concentración que la muestra inicial. Las aguas residuales de origen químico, sustenta un buen tratamiento en base a la técnica electrocoagulación adecuando el proceso de oxidación y remoción de la DQO, pero su aplicación puede aumentar los SST en el agua tratada.

Prieto et al. (2014) publicaron en la Universidad Nacional de Colombia el artículo “Electrodisolución de electrodos de aluminio durante la electrocoagulación de un lactosuero ácido”, con el objetivo de “Estudiar la electrodisolución de aluminio en soluciones conteniendo iones cloruros o sulfatos durante el proceso de electrocoagulación del lactosuero ácido, ha sido”. Los pH alcalinos aumentan la velocidad de

disolución en varios órdenes de magnitud. El medio electrolítico (Cl^- o SO_4^{2-}) no parece influir significativamente en la disolución de aluminio, pero aumentan la densidad de carga, que ayuda en el proceso electroquímico. Los resultados están relacionados con la naturaleza de las especies de hidróxidos de aluminio formados durante la disolución anódica. En condiciones ácidas y neutras, los iones OH^- del cátodo no participan completamente en la formación de especies neutras de hidróxido de aluminio y el exceso de iones OH^- aumenta el pH del medio. En contraste, el pH disminuye en condiciones altamente alcalinas atribuido al consumo de grandes cantidades de iones OH^- para formar especies aniónicas, tales como $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ y $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$ y otras especies oligoméricas de aluminio.

Linares, et ál. (2011) realizaron en Toluca, Mexico la tesis sobre la “Oxidación de materia orgánica persistente en aguas residuales industriales mediante tratamientos electroquímicos”. Con el objetivo de “Implementar un sistema electroquímico, mediante tratamientos de electrocoagulación, empleando electrodos de hierro y oxidación anódica directa (OAD) y electrodos de diamante dopados con boro (DDB), para tratar aguas residuales provenientes de una planta de tratamiento que recibe las descargas de 144 empresas de diferentes giros, de la zona industrial Toluca-Lerma, México”. Los resultados de estos tratamientos, indicaron una remoción del 99 % de la demanda química de oxígeno (DQO), 99 % de color y 97 % de turbiedad, en un tiempo de 2 horas. Las condiciones de operación en el proceso de oxidación electroquímica, siendo estas: intensidad de corriente constante de 4 A, densidad de corriente de 80 mA/cm^2 y pH cercano al neutro de 7,2 a 8,0. En el sistema acoplado, la electrocoagulación removió las partículas coloidales y suspendidas y la OAD, permitió la degradación de materia orgánica persistente. Se determinó la cantidad de lodos generados en el sistema y se caracterizaron por microscopia electrónica de barrido y análisis elemental. Se concluye que los métodos electroquímicos resultan ser

aplicables y eficientes en la degradación compuestos que no son fácilmente biodegradables.

Ojeda y Hing (2009) publicaron en Cuba el artículo “Tratamiento por electrocoagulación y coagulación - floculación de la vinaza de destilerías”, con el objetivo de “Análisis de las variables que influyen en la obtención de sólidos a partir de la vinaza, mediante un proceso de electrocoagulación (EC), y posteriormente someter el líquido residual a un proceso de coagulación/floculación”. Para disminuir la agresividad de este residual se utilizó el coagulante PERCOL-734, y se midieron parámetros tales como DQO, SST, conductividad y pH aplicando el método de pruebas de las jarras. El análisis consideró las variables: el tiempo de residencia, la intensidad de corriente y el pH de la vinaza, obteniéndose combinaciones óptimas para obtener una mayor cantidad de sólidos en las variables respuestas: sólidos obtenidos en el líquido y en la espuma. Para los sólidos obtenidos en el líquido el pH y tiempo de residencia fueron las variables más significativas estadísticamente, y para los sólidos obtenidos en la espuma fueron el pH y la intensidad de corriente. Ninguna de las interacciones resultó significativa en los sólidos obtenidos en la espuma y en el líquido. En la etapa de coagulación - floculación se obtuvo valores de 60 - 80 mg/l como una dosificación óptima disminuyendo su agresividad.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Milla (2019) realizó en Cañete, Lima la tesis de maestría “Equipo de electrocoagulación con electrodos móviles para el tratamiento de aguas de pozo”, con el objetivo de “Construir el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles para el tratamiento de aguas de pozo”. Se observó previamente la situación de la población consumidora de aguas de pozo en los distritos de la provincia de Cañete y Lima Sur, tomando distintas muestras para aplicar el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles y comprobar la modificación de sus parámetros. Se realizaron

nueve ensayos con aguas de tres pozos, cada cinco, diez y quince minutos aplicando diferencias de potencial de tres, seis y nueve voltios a velocidades de 40, 90, y 140 revoluciones por minuto (RPM), los resultados obtenidos se usaron para las pruebas de hipótesis. Los instrumentos de medición empleados son, conductímetro (con lector de conductividad y sólidos totales disueltos (STD)), pH metro, cronómetro, y velocímetro digital. En esta investigación se diseñó y construyó un equipo de electrocoagulación con electrodos móviles, distinto a los existentes los que tienen electrodos estáticos con tanque trapezoidal. El equipo de carácter único en este género fue sometido a prueba de funcionamiento electrocoagulando aguas de pozo demostrando su eficiencia. Los resultados encontrados se comprueban con la eficiencia del equipo en la modificación de la conductividad, el pH y los sólidos totales disueltos de las aguas de pozo. Se concluyó que el diseño del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles presenta ventajas en contraste con el equipo de electrocoagulación convencional en la geometría de los electrodos, la geometría del tanque reactor y en la precisión de las lecturas de la conductividad, pH, y sólidos totales disueltos.

Malca, Gonzales, Farfán y Licapa (2019) publicaron el artículo sobre la “Influencia del amperaje y tiempo de residencia sobre la remoción de metales pesados en aguas ácidas por electrocoagulación, de la Universidad Privada del Norte Sede Cajamarca - Perú”, con el objetivo de “Determinar la influencia del amperaje y tiempo de residencia sobre la remoción de metales pesados en el tratamiento de aguas ácidas por electrocoagulación”. La investigación presento un diseño experimental del nivel aplicada mediante un proceso de flujo. Este proceso electroquímico consistió en desestabilizar las altas cargas de contaminantes mediante el uso de electrodos, generando un intercambio iónico. Con un determinado tiempo las partículas suspendidas generan una zona de sedimentación y flotación debido a la densidad de los

metales, dando como resultado la remoción de los metales presentes y la mejora de la calidad del. Para demostrar este procedimiento se tomaron 80 L de muestra, de aguas acidas, de los Pad's seis y siete en un intervalo de pH entre 2,00 y 2,12; se operó con un reactor de 10 A, 2 electrodos, cátodo y ánodo, en un tiempo de 3 h con 3 min. Logrando resultados entre 70% - 100% de remoción de metales presentes y un Tipo III de agua de acuerdo al estándar de calidad de agua (ECA). De acuerdo a ello las variaciones del amperaje, la cantidad de electrodos y tiempo de residencia; mostraron cambios fisicoquímicos, consiguiendo un pH entre 5,15 y 6,00.

Terán (2019) realizo en la Universidad Privada del Norte la tesis "Tratamiento de drenaje ácido de mina, por electrólisis para la remoción de plomo, Hualgayoc – Cajamarca 2019", con el objetivo de "Estudiar la influencia de la densidad de corriente y el tiempo de retención, para realizar la remoción de Plomo del drenaje acido de mina (DAM)". La tesis de alcance experimental utilizo 300 mL de DAM, esta fue sometida a diferentes densidades de corriente 10, 20 y 40 mA/cm² y en diferente tiempo de retención a 15, 30 y 60 minutos. Al finalizar los 30 experimentos se logró una remoción del 97,55 % de plomo del drenaje acido de mina, disminuyendo así la toxicidad. Los resultados del estudio concluyo que la reducción del plomo a 30 minutos y 40 mA/cm², fue de 48,45 % de plomo y a medida que siga aumentando, la remoción aumentara, es así que se llegó a obtener una remoción de 98,96 % a un parámetro de trabajo de 60 minutos y 40 mA/cm². Acorde a los resultados y demostraciones se puede recomendar en optar esta técnica de electrolisis como una tecnología emergente y como una alternativa para los tratamientos de aguas acidas y como también para una clausura de minas de forma exitosa.

Gonzales y Malca (2019) realizaron en Cajamarca, Perú la tesis "Influencia del amperaje y tiempo de residencia sobre el porcentaje de

remoción de metales pesados en el tratamiento de aguas ácidas de minera Yanacocha S.R.L. por electrocoagulación, 2019”, con el objetivo de “Determinar la influencia de la densidad de corriente sobre la remoción de metales pesados en el tratamiento de aguas ácidas de minera Yanacocha S.R.L. por electrocoagulación”. La investigación asumió el enfoque aplicado, trabajando una muestra de 80 litros de agua de los Padés 6 y 7 de Yanacocha Norte, con pH iniciales de 2.00 y 2.12, trabajando con un reactor de 10 A, en un tiempo promedio de 3 horas y 36 minutos, con 2 electrodos (cátodo - ánodo). Los mejores resultados de remoción de metales presentes en promedio se obtuvieron en el cuarto ensayo entre 70 y 100 % de remoción logrando un ECA de agua del tipo III, observaron cambios fisicoquímicos, obteniéndose un pH entre 5.15 y 6.00, bajo las condiciones de variación en la intensidad de amperaje, número de electrodos y tiempo de residencia.

Castañeda y Choton (2018) realizaron en la Universidad de Trujillo la tesis sobre el “Estudio de la densidad de corriente y tiempo de residencia en el proceso de electrocoagulación y su influencia en la reducción Fe^{2+} de solución de drenaje ácido de mina”, con el objetivo de “Explicar el efecto de la densidad de corriente y tiempo de residencia, en el proceso de electrocoagulación (EC) sobre el control del porcentaje de reducción de Fe^{2+} en soluciones de drenaje ácido de mina”. La investigación presenta el método experimental basado en la construcción y diseño de una celda de EC. Se optó como variables de investigación a la densidad de corriente eléctrica (DCE) de 20, 40 y 80 mA/cm² y tiempos de residencia de 10, 20, 40 y 60 minutos conjugados, dentro de estos parámetros de investigación se tomaron valores de pH, conductividad eléctrica y porcentaje de remoción de Fe^{2+} con un pre y post test durante el proceso de EC en un drenaje ácido de mina (DAM). La muestra comprendió 350 ml, que a una DCE de 80 mA/cm² y en un tiempo de 40 minutos, se obtuvo una remoción de iones de Fe^{2+} en un 76,20 %. Así mismo se obtuvo un porcentaje mínimo de remoción del 17,97 % con

una densidad de corriente de 20 mA/cm². El porcentaje de remoción se atribuye a la DCE, que en el rango de pH de 6 - 7 se generó más flóculos de formación de lodos y óxidos metálicos. Se llegó a la conclusión de que la DCE es la variable de mayor influencia sobre la reducción de Fe²⁺, por medio del proceso de EC.

Calderón y Aramburú (2017) publicaron en la Universidad Nacional Mayor San Marcos de Lima, Perú el artículo “Estudio de la electrocoagulación para controlar la turbiedad y el pH en el tratamiento de efluentes minero metalúrgicos polimetálicos”, con el objetivo de “Estudiar la electrocoagulación para controlar la turbiedad y el pH en el tratamiento de efluentes minero metalúrgicos polimetálicos, donde se perfila, como un proceso que se puede innovar para el tratamiento de aguas provenientes de los procesos minero metalúrgicos y optimizar los parámetros de control”. La hipótesis planteada es de controlar la turbiedad y el pH en el tratamiento de efluentes mineros metalúrgicos, cumpliendo con las leyes de descargas mineras. El resultado antes del tratamiento comprende una absorbancia de 2,223 y 2769,175 mg/l, sólidos totales suspendidos (STS), pH = 10, con una eficiencia de pH al 95 %. Después del tratamiento la absorbancia fue de 0,045 y 46,68 mg/l de STS, pH = 8, con una eficiencia del pH al 98 %. Las dimensiones de los electrodos (ánodo 0,0925 m², y cátodo 0,3041 m²) trabajaron a una intensidad de corriente de 86,47 A/m², 2 V y 5 A determinando el voltaje óptimo de 2V, y logrando una disminuir la turbiedad de 2769,175 mg/l a 46,68 mg/l y una reducción de pH de 10 a 8.

Mayta y Mayta (2017) publicaron en la Universidad Nacional del Altiplano Puno, Perú el artículo titulado “Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación”, con el objetivo de “estudiar la remoción de cromo (III) y demanda química de oxígeno (DQO) de aguas residuales de curtiduría por electrocoagulación (EC) en un reactor electroquímico de

operación discontinua”. Se realizó en un reactor electroquímico de sistema batch provisto de una fuente de poder de 14 Volts y 9 Amperios. La celda de material acrílico tuvo una capacidad de 1,3 L y 7×7 cm² de área de reacción. Se utilizó seis electrodos (3 ánodos y 3 cátodos) de aluminio (Al) a una distancia de 1 cm entre electrodos. El predominio de tiempos (15 a 45 minutos), voltajes (5 a 10V), diluciones (0 a 2) y sus interacciones en el proceso de EC fueron significativos (p-value < 0,05). Durante el tratamiento de EC se observó incrementos en el pH, temperatura y disminuciones de la conductividad eléctrica. La máxima remoción de cromo III alcanzo un 98 % y DQO en 48 % con un tiempo de 45 min, 10 V y dilución de 2. Del mismo modo, los resultados experimentales facultaron desarrollar modelos matemáticos para la remoción de cromo III y DQO, individualmente.

Diaz (2017) realizo en Arequipa, Perú la tesis de maestría “Evaluación de un tratamiento electroquímico con electrodos recubiertos con bentonita para la remoción de Hg (II)” con el objetivo de “Evaluar el tratamiento electroquímico para la remoción de Hg (II) utilizando electrodos recubiertos con bentonita”. Se trata de una investigación de alcance aplicativo donde el Hg (II) se cuantificado en una estación voltamperométrica VA-757 utilizando electrodos de disco rotatorio de oro, grafito (como electrodo auxiliar) y Ag/AgCl/NaCl (como electrodo de referencia), realizando la estandarización de la técnica con un rango de trabajo entre 2 µg/L y 14 µg/L. Se evaluó los electrodos recubiertos con bentonita y fue sometida a baño por ultrasonido mostrando un tamaño de 350 nm aproximadamente, para la adherencia y la activación de la bentonita sobre la superficie del electrodo a una temperatura de 250 °C, a voltajes de 10 V. Los porcentajes de remoción de Hg (II), fueron mayores al 10 % en todos los casos, sin embargo, los mejores resultados son aquellos en donde se empleó un pH = 2, un número de pinceladas de 10 y un tiempo de tratamiento electroquímico de 50 minutos, obteniéndose resultados superiores a 80 % de remoción. Dando por

conclusión que el factor más influyente es el tiempo de tratamiento electroquímico, y que a un pH menor el porcentaje de remoción aumenta (interacción entre pH y tiempo de tratamiento electroquímico).

Arévalo (2016) realizó en Trujillo, Perú la tesis de maestría “Influencia de la densidad de corriente y tiempo de residencia en la reducción de arsénico de efluentes artificiales mediante el proceso de electrocoagulación”, con el objetivo de “Determinar el efecto de la densidad de corriente y el tiempo de residencia, sobre el porcentaje de reducción del arsénico en solución acuosa, mediante el método de electrocoagulación (EC)”. La investigación sustenta un alcance experimental que utilizó cátodos de acero de la serie ASTM A-36 y ánodos de aluminio de la serie AA-1050 con dimensiones 5.0 x 5.0 x 0.2 cm, haciendo un total de 96 electrodos. El reactor de electrocoagulación realizó 48 ensayos; considerando factores de velocidad de agitación, pH inicial y manteniendo relación áreas constantes en cada electrodo. De acuerdo a los ensayos realizados, se determinó significativamente que, al incrementar la densidad de corriente eléctrica y el tiempo de residencia, también se incrementa el porcentaje de reducción de arsénico en la solución de estudio. De esto se desprende que la influencia del tiempo de residencia es más significativa que la densidad de corriente eléctrica aplicada. De los ensayos efectuados se logró un porcentaje de reducción del 99.20 % trabajando a una densidad de corriente de 40 mA/cm² con un tiempo de residencia de 45 minutos dando incrementos de unidades de pH. La velocidad óptima de reducción se logró a los 15 minutos de ensayo para todos los niveles de densidad de corriente aplicada.

Quispe (2015) realizó la tesis “Electrocoagulación en la remoción de mercurio de las aguas residuales en el Centro Poblado la Rinconada Puno”, con el objetivo de “Evaluar la electrocoagulación para la remoción de mercurio de aguas residuales”. Las pruebas experimentales procesaron volúmenes de 1000 mL de muestra, para lo cual se construyó

una celda de electrocoagulación de material acrílico, con una configuración monopolar con 5 placas de aluminio (electrodos), 3 de ellas conectadas al ánodo y 2 al cátodo con una separación de 2 cm entre placas. El proceso de electrocoagulación produjo un incremento de unidades de pH, conductividad eléctrica y cloruros. También se reportó una reducción en las concentraciones de sulfatos, magnesio, dureza, alcalinidad, calcio y mercurio en las muestras de agua residual. Las variables de operación fueron la densidad de corriente (J), concentración de NaCl (m) y tiempo de electrocoagulación (t) que trabajaron concentraciones de mercurio de 0,596 mg/L y 0,522 mg/L. El porcentaje de remoción de mercurio fue la variable respuesta. Los resultados de operación arrojaron porcentajes altos de remoción de Hg siendo en la M1 un 97 % y en la M2 94,93 % operando a una densidad de corriente de 6,61mA/cm², concentración de NaCl de 3 g/L y 30 minutos de tratamiento. El proceso estadístico modelo una regresión de segundo orden ajustados de las variables de estudio.

Aguilar (2015) realizó en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos Lima, Perú el artículo “Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua.”, con el objetivo de “Determinar la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de aguas. La investigación de tipo aplicada, presenta las dimensiones de 15x20x20 cm con la capacidad de tratar un volumen de 4,5 litros de agua residual. Los materiales manipulados como electrodos fueron aluminio (Al) y hierro (Fe) colocados a lo largo del reactor”. Se llegó a los resultados óptimos, llegándose a reducirla hasta 17 UNT (97 %) en un tiempo de 15 minutos. Se concluye que, se determinó una eficiencia promedio del 87 % en la remoción de la demanda química del oxígeno (DQO). Estos valores óptimos de manipulación, se obtuvieron a una intensidad de corriente I = 5 Amperios, con el pH neutro del efluente de 7,12 y un tiempo de tratamiento de 15 minutos, con lo cual se cumple la normativa ambiental

vigente en el país. Otra diferencia resaltante observado en este estudio fue la calidad del lodo producido en el tratamiento, de aspecto mucho más compacto que un lodo físico químico o biológico.

Carhuancho y Salazar (2015) realizaron en Trujillo, Perú la tesis “Estudio del efecto de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales a nivel de laboratorio en la planta de tratamiento de aguas residuales Covicorti en la ciudad de Trujillo - Libertad”, con el objetivo de “Aplicar el método de electrocoagulación para disminuir la carga orgánica contenida en las aguas residuales que llegan a las lagunas de oxidación de la planta de tratamiento Covicorti”. La tesis sostiene un alcance experimental, donde se empleó un electrodo como cátodo, separado 3 cm de los otros electrodos. El tipo de reactor mantiene el sistema tipo Batch, con 3 L de volumen, con un tiempo de operación de 30 min y tiempo de reposo de 60 minutos. Los parámetros biofísicoquímicos evaluados obtuvieron porcentajes máximos de remoción de 97,32 % de Color (PCU); 96,48 % de SST (mg/l); 93,56 % de Turbiedad (UNT); 90,95 % de DQO (mg/l); 58,24 % de DBO₅ (mg/l). De acuerdo proceso de tratamiento también se generó lodo activado con alta carga de materia orgánica. En el proceso de eficiencia de electrodos, resultó ser más eficiente la placa de Aluminio como ánodo. Enmarcado en este fundamento, este proceso de electrocoagulación se convierte en una técnica electroquímica que puede obtener resultados admirables en su aplicación, optimizando la conservación y recuperación del recurso hídrico.

Porto (2014) realizó la tesis “Evaluación de la remoción de arsénico por electrocoagulación de aguas mineras, de la Universidad Nacional del Altiplano, Puno-Perú”, con el objetivo de “Evaluar la remoción del arsénico por electrocoagulación en aguas mineras”. La investigación de alcance experimental a escala de laboratorio presentó un reactor del tipo batch compuesto por 3 ánodos de aluminio (Al) con una superficie activa

de 288cm², 2 cátodos de acero inoxidable con una configuración monopolar a una separación entre electrodos a 1,5 cm y un volumen de tratamiento de 1,0 litros. El proceso obtuvo un porcentaje de remoción de arsénico equivalente a 92,57%, representando una concentración arsénico final de 0,0075 mg As/L, logrando niveles de arsénico por debajo del límite establecido por el estándar de calidad ambiental (ECA) para el agua categoría 3 dentro de las condiciones de operación: concentración inicial de As = 0,101 mg/L, t = 17,17 minutos y densidad de corriente (DC = 1,88 mA/cm²).

2.1.3. Antecedentes locales

Farfán (2019) realizó en Huancavelica, Perú la tesis de maestría “Influencia de la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico sobre la remoción de plomo por electroremediación de relave de la empresa minera paredones”, con el objetivo de “Tratar los suelos contaminados, y eliminar metales pesados, como el plomo presente en relaves de mina de la empresa minera Paredones”. El proceso de electroremediación, trabajo con una densidad de corriente de 10, 20 y 30 mA/cm², con 5, 10, 15 mol/L de concentración de ácido oxálico con un tiempo de residencia de 24 horas como mínimo. El parámetro base de medición fue el pH, con una distancia de 10 cm entre electrodos, observando que el pH se incrementa del ánodo hacia el cátodo. De acuerdo a los resultados alcanzados, se pudo percibir una eficiencia máxima de remoción de Pb, en un 83,77 %, con una densidad de corriente eléctrica de 30 mA/cm² y de ácido oxálico de 15 mol/L, y de acuerdo a los análisis estadísticos se confirma que la variable de mayor influencia en el proceso de tratamiento de suelo, fue la densidad de corriente.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Drenaje Ácido de Minas (DAM)

En los procesos de oxidación de los sulfuros en combinación con el azufre (menos frecuente, como el arsénico, antimonio, bismuto, selenio

y telurio, comportándose como metales o semimetales) y sulfosales, que son considerados sulfuros dobles o complejos en su mayoría (más presentes arsénico, antimonio y bismuto, comportándose semejante a los metales), son sulfuros poco frecuentes en la corteza terrestre. Pero a su vez, en ciertas circunstancias geológicas la abundancia de estos minerales puede, llegar a convertirse en contaminantes mayoritarios. El elevado contenido de sulfuros en la extracción de metales de transición en especial los dúctiles como el oro (Au), plata (Ag), Hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn) y los no metales como el plomo (Pb) y la obtención de ácido sulfúrico han, provocado una enorme explotación y aprovechamiento por parte del hombre a lo largo de la historia. Entre ellas tenemos a la pirita (FeS_2) que es el sulfuro más frecuente en la naturaleza, encontrándose en formaciones hidrotermales, rocas ígneas y depósitos sedimentarios (Aduvire, 2006).

Los sulfuros (combinación de un azufre, oxidación -2, más un elemento químico o con un radical) son muy insolubles y estables bajo las condiciones reductoras que existen en el subsuelo. Debido a la exposición de estos minerales a condiciones atmosféricas desestabiliza su estructura mediante reacciones de oxidación. El agente oxidante para que se produzca este proceso puede ser el oxígeno (O_2) o el hierro férrico (Fe^{3+}), minerales sulfurosos reactivos, agua o atmosfera húmeda. Por otro lado, dependiendo de la ausencia o presencia de microorganismos o bacterias (*Thiobacillus ferrooxidans*) que catalicen las reacciones de meteorización se habla de oxidación abiótica o biótica, respectivamente. El DAM, depende del tiempo y comprende tanto reacciones químicas de oxidación como fenómenos físicos relacionados consiste en la aparición de aguas con pH típicamente entre 1.5 y 4.0 y altas concentraciones de metales tóxicos como consecuencia de la exposición subterránea de sulfuros metálicos durante su explotación minera.

Los procesos DAM representan uno de los tipos de contaminación acuática más peligrosos, por su naturaleza, extensión y dificultad de tratamiento, así como por los costos económicos de su remediación

habitual. Los cuerpos de agua afectados por este tipo de contaminación se caracterizan por su acidez, así como por el alto contenido en sulfatos y metales pesados de sus aguas y por el contenido metálico de sus sedimentos. Los perjuicios producidos varían desde alteraciones sub letales para algunos organismos de los ecosistemas afectados en los casos de polución muy débil, con problemas asociados de bioacumulación y de biomagnificación hasta la desaparición de la fauna fluvial, así como la pérdida de los recursos hídricos al tornarse inservible el agua para el consumo humano, agrícola o industrial (Canteli, Arranz, y Aduvire, 2003).

2.2.1.1. Clases de drenajes de mina

Para establecer la clase de drenaje es necesario realizar un estudio detallado del medio geográfico, el clima del medio y la tipificación de los efluentes de mina, para ello, se realizan muestreos de agua y sedimentos para su análisis en laboratorio y estimar las concentraciones metálicas presentes, también se recurre a la medición in situ de parámetros como: el pH, contenido de oxígeno, potencial redox, conductividad, temperatura, Fe, acidez e alcalinidad, turbiedad y otros.

White (1998), clasifico los drenajes de aguas acidas de mina en función al pH.

Tabla 1
Clasificación de un DAM en base al pH

CLASE	pH
Altamente ácidas	1.5 a 4.5
Blandas, ligeramente ácidas	5.0 a 7.0
Duras, neutras a alcalinas	7.0 a 8.5
Blandas, alcalinas	7.5 a 11.0
Muy salinas	6.0 a 9.0
Blandas ácidas	3.5 a 5.5

Fuente: White (1998)

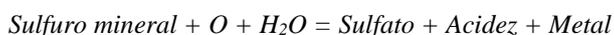
Morin y Hutt (2011) clasifica los drenajes de aguas acidas de mina en función al pH del drenaje y los contenidos de metales o especies minerales.

Tabla 2*Clasificación de un DAM en base a especies minerales*

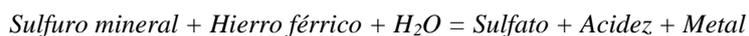
CLASE	pH	DESCRIPCION
Acido	< 6	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Acidez generada por oxidación de minerales, particularmente de sulfuros. ▪ Nivel de metales disueltos es mayor que en drenajes casi neutros. ▪ Asociado a minas metálicas, carbón y piritas.
Alcalino	> 9 ó 10	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta alcalinidad generada por disolución de minerales básicos, particularmente óxidos, hidróxidos y algunos silicatos. ▪ Niveles de algunos metales como el Al son mayores que en los drenajes casi neutros. ▪ Asociado con minería de diamantes, molienda de bauxita, cenizas de combustión de carbón.
Casi neutro	6 - 9 ó 10	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dependiendo de la abundancia de los minerales, en determinados periodos pueden ser ácidos o alcalinos. ▪ Concentración de metales disueltos algunas veces puede exceder niveles tóxicos.
Otros	Irrelevante	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Puede afectar la concentración de metales. ▪ Asociado a minería no metálica como: potasa, sales, boratos, bentonitas, gravas, arcillas, etc.

Fuente: Aduvire, (2006)

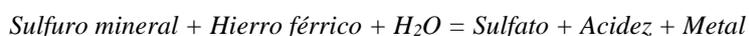
El DAM es el resultado de la oxidación de algunos sulfuros minerales como: esfalerita (sulfuro de zinc), la galena (sulfuro de plomo), la calcopirita (sulfuro de hierro y cobre), la bornita (sulfuro de hierro y cobre) y entre otros al entrar en contacto con el oxígeno y agua:



Los oxidantes como hierro férrico puede sustituir al oxígeno del aire en la reacción y en algunos casos al oxígeno del agua:



Sucede lo contrario en los drenajes alcalinos de mina (DLM) ya que es el resultado de la disolución de óxidos, hidróxidos y silicatos minerales:



2.2.1.2. Procesos de formación de DAM

Durante el proceso de formación de aguas ácidas, se da el proceso de oxidación e hidrólisis química de los sulfuros, y esta se acelera en diversos casos por la acción bacteriana. Los elementos que intervienen son: los sulfuros reactivos, el oxígeno y el agua (vapor y/o líquida), y las bacterias como elemento catalizador. La velocidad de reacción es una variable muy importante, pues si el proceso ocurre muy lentamente el efecto sobre el medio puede ser despreciable. Sin embargo, si la generación de aguas ácidas es rápida el problema se agrava, ya que se producirá la contaminación del entorno. Aunque esta velocidad media de reacción depende de varios factores como la temperatura, cantidad de sulfuros, granulometría, presencia de agua, aire y bacterias. Ciertas especies geológicas son más reactivas que otras; por ejemplo, la marcasita, que tiene la misma fórmula química que la pirita, es muy inestable y puede generar velozmente aguas ácidas. Los sulfuros de otros metales (Pb, Zn o Cu) son habitualmente menos reactivos que los de hierro (Fe). De acuerdo a la mayor estabilidad de su estructura cristalina y también porque forman minerales menos solubles que recubren la superficie de los propios sulfuros impidiendo que progrese su oxidación (Aduvire, 2006).

Categorías de un DAM

- ***Drenajes alcalinos***

Los efluentes alcalinos en las explotaciones mineras se originan cuando las filtraciones desde superficie o desde acuíferos suprayacentes circulan a través de materiales calizos (carbonato de calcio CaCO_3) y dolomíticos (carbonato doble de calcio y magnesio $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). La disolución del carbonato cálcico adquiere un lugar debido a la presencia de anhídrido carbónico (CO_2) en el agua y da espacio a la siguiente reacción química:



El contenido en ion bicarbonato (HCO_3^-) en los efluentes es el que marca la alcalinidad de éstas, la alcalinidad total se mide en mg/l y se puede apreciar mediante la siguiente expresión química:

$$100[(\text{HCO}_3^-) + 2(\text{CO}_3^{2-}) + (\text{OH}^-)]$$

Sin embargo, no es habitual, que los efluentes alcalinos en algunos casos pueden ser tan perjudiciales como las aguas acidificadas. Las rocas recién excavadas dan lugar a una mayor aportación de contaminantes que las superficies de igual litología que no han sufrido alteración, ya que las superficies libres son más fácilmente lixiviables. Algunos efluentes alcalinos contienen altas concentraciones de hierro ferroso (FeO), que tras su oxidación e hidrólisis pueden llegar a cambiar el drenaje al tipo ácido. Estas tipologías de descargas son más comunes en minas subterráneas que en las de tajo abierto (Aduvire y Aduvire 2005).

▪ *Drenajes ácidos*

En todo proceso de explotación de determinados yacimientos (sulfuros metálicos, carbón, hierro, uranio y otros) permanecen expuestos a la meteorización grandes cantidades de minerales sulfurosos que pueden llegar a formar drenajes ácidos. Para este proceso tenga lugar son necesarias las condiciones aerobias, es decir la coexistencia de cantidades suficientes de agua, oxígeno y simultáneamente la acción catalizadora de bacterias.

Nordstrom y Alpers (2000) describen los procesos de oxidación de la pirita (FeS_2) como principal responsable de la formación de aguas ácidas y, verifican que estas reacciones geoquímicas se aceleran en áreas mineras debido a que el aire entra en contacto con mayor facilidad con los sulfuros a través de las labores de acceso y la porosidad creada en las pilas de estériles y residuos, unido a ello el cambio de composición química y el

incremento de la superficie de contacto de las partículas. Igualmente se afirman que los procesos físicos, químicos y biológicos tienen gran predominio en la generación, movilidad y atenuación de la contaminación ácida de las aguas, y los factores que más afectan a la generación ácida son el volumen, la concentración, el grosor de grano y la distribución de la pirita. Skousen, Simmons, McDonald, y Ziemkiewicz (2002) a partir del pH, contenido de oxígeno y metales pesados lo clasifican los drenajes de mina y lo agrupan en cinco tipos.

Tabla 3
Tipos de un DAM

Tipo	pH	DESCRIPCION
I	< 4.5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta concentración de Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, y otros metales. ▪ Alto contenido de oxígeno. ▪ Muy ácido (llamado Drenaje Ácido de Mina)
II	< 6.0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta cantidad de sólidos disueltos. ▪ Alta concentración de ion ferroso (Fe^{2+}) y Mn. ▪ Bajo contenido de oxígeno. ▪ Por oxidación, el pH del agua baja drásticamente hasta convertirse en tipo I.
III	> 6.0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Moderada a alta cantidad de sólidos disueltos. ▪ Bajo a moderado contenido de ion ferrosos (Fe^{2+}) y Mn. ▪ Bajo contenido de oxígeno. ▪ Alta alcalinidad (llamado Drenaje Alcalino de Mina) ▪ Por oxidación de metales la acidez generada es neutralizada por la alcalinidad presente en el agua.
IV	> 6.0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta cantidad de partículas disueltas. ▪ Drenaje neutralizado, pero todavía no se ha fijado los hidróxidos en el agua. ▪ A mayor tiempo de residencia en las balsas mayor fijación de partículas y el agua puede llegar a ser similar al Tipo V.
V	> 6.0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Agua del drenaje es neutralizado. ▪ Alta cantidad de sólidos disueltos. ▪ Gran cantidad de hidróxidos precipitados y fijados en las balsas. ▪ Cationes restantes son disueltos por Ca y Mn. ▪ Oxi-aniones solubles como bicarbonato y sulfato quedan en la solución.

Fuente: Skousen, Simmons, McDonald, y Ziemkiewicz (2002)

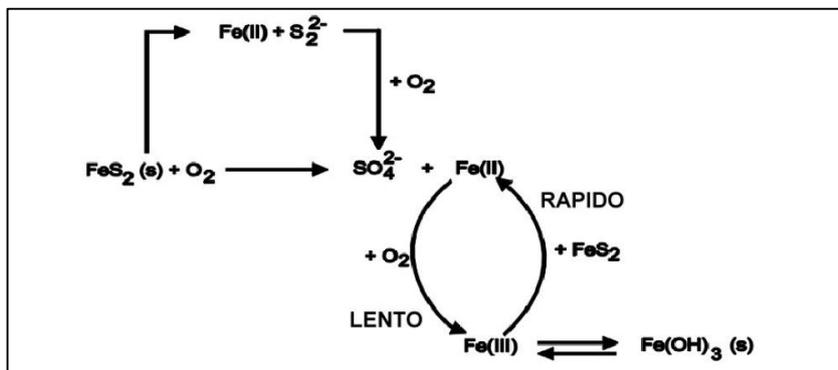
Efectivamente, los drenajes de medios mineros pueden ser ácidos o alcalinos, pueden degradar el hábitat acuático y cambiar la calidad de las aguas debido a su toxicidad, corrosión y otros efectos producidos por la disolución de sus constituyentes. Por lo general tienen unos valores de pH entre 2 a 9, contienen cationes y aniones en disolución (de < 1 a 100.000 mg/l), predominando elevadas concentraciones de

SO₄, Fe, Mn y Al, y en menor proporción Ca, Na, K, Mg y otros elementos.

Un drenaje es ácido cuando los minerales ácidos exceden a los alcalinos, puede tener elevadas concentraciones de SO₄, Fe, Mn, Al y otros iones, puede tener o no bajo pH, pero la presencia de Fe, Al y Mn disueltos pueden generar iones H⁺ por hidrólisis (alta concentración iones H⁺) y bajar el pH. En cambio, en los drenajes de mina neutros o alcalinos (alcalinidad igual o mayor que acidez) también pueden tener elevadas concentraciones de SO₄, Fe, Mn y otros solutos, pero las disoluciones de los minerales carbonatados neutralizan la acidez y remueven Fe, Al y otros iones metálicos, y sin embargo no afecta significativamente la concentración de SO₄.

- En drenajes ácidos el anión principal es el SO₄ y los cationes mayoritarios son Fe, Mn y Al.
- En cambio, en drenajes alcalinos el HCO₃ es más significativo que el SO₄ y los contenidos de Ca, Mg y Na son más elevados que los de Fe y Al.

Figura 1
Formación de un DAM



Fuente: Aduvire (2006)

2.2.1.3. Etapas en la formación de DAM

Las minas en operación o abandono producen drenajes mineros, las cuales conciben problemas de contaminación y degradación

de los ecosistemas, logrando conseguir a extinguir la vida marginal de los efluentes de río y debido a su elevada acidez, frena el uso de estas aguas para consumo humano, por su alta concentración de metales pesados disueltos como Fe, Mg, Al, As, Se, Zn, Ni, y entre otros (Aduvire y Ford, 2000). Del mismo modo, causa daño a las estructuras metálicas y de hormigón, así como la decadencia o desaparición de la vegetación y la fauna de los cauces naturales.

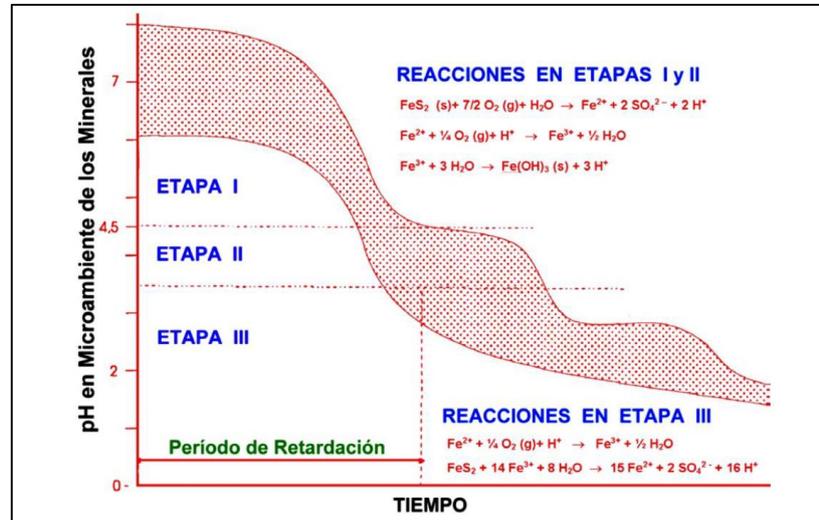
Existen diversas formas de evitar la formación de aguas ácidas, y una de ellas es la neutralización por medio de procesos fisicoquímicos. En este proceso, la oxidación de una tonelada de pirita origina casi una tonelada (Tn) de hidróxido férrico y cerca de tonelada y media de ácido sulfúrico.

De acuerdo Aduvire y Ford (2000) las causas de formación de aguas ácidas, en su extensión, se explican en tres etapas.

Primera etapa

La oxidación de minerales sulfurosos libera óxido ferroso (FeO) que bajo condiciones neutras se oxida químicamente y se transforma a óxido férrico (Fe₂O₃) que precipita como hidróxido y aporta acidez al medio. En esta etapa del proceso la velocidad de oxidación es baja en los dos mecanismos de generación ácida (directa e indirecta) y la formación de aguas ácidas por oxidación debida al oxígeno y a las bacterias (fundamentalmente Thiobacillus ferrooxidans) se producen a un ritmo análogo. Usualmente, la alcalinidad utilizable en el medio acuático es suficiente para neutralizar en cierta medida la acidez que ha causado lentamente.

Figura 2
Etapas en la formación de aguas àcidas



Fuente: Aduvire y Ford, (2000)

Segunda etapa

Predomina la oxidación de la pirita por acción bacteriana cuando el pH desciende y la acidez acumulada supera la capacidad de neutralización del medio y en el proceso de reacción se produce sulfato ferroso que al oxidarse de nuevo se transforma en sulfato férrico, y al hacer contacto con el agua produce ácido sulfúrico que al interactuar con el hidróxido férrico (insoluble) produce la coloración amarilla de las aguas. En esta etapa disminuye la eficiencia del mecanismo directo (oxidación por el aire) y aumenta mucho la del indirecto.

Tercera etapa

Si el pH decrece sobre 3 unidades de H^+ en el agua de 4,5 aproximadamente, los granos de pirita (el ion férrico (Fe^{3+})) se ve afectado por las reacciones de oxidación/reducción y la acción bacteriana puede lixiviar el sulfuro de hierro directamente a sulfato. Se observa la variación la generación de ácido al incrementar la solubilidad del hierro dando lugar a la disminución y precipitación de hidróxido férrico. En definitiva,

el *Thiobacillus ferrooxidans* oxida el ion ferroso (Fe^{2+}) a férrico(Fe^{3+}) que a su vez oxida a los sulfuros (pirita) causando aumentos de ácido, originan grandes volúmenes de aguas ácidas. Con lo cual se tiene los siguientes aspectos:

- Si se inhabilita la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* (el que autocataliza) la fabricación de ácido se reduce al menos en un 75%, por lo que se considera el mecanismo más importante siendo el *indirecto*.
- Si se incrementa por encima de 5 unidades el pH del agua, igualmente se inhibe la oxidación.
- Si decrece por debajo de 4,5 unidades el pH del agua se debe esperar a que todo el sulfuro de hierro acabe de oxidarse.
- Si decrece por debajo de 2,5 unidades el pH del agua, se crea un equilibrio en la que el dinamismo bacteriano se estabiliza, y esta habrá logrado su óptimo desarrollo (la velocidad de reacción habrá aumentado en 105 - 106 veces respecto al mecanismo *directo*).

Tabla 4
Clasificación de un DAM

SUB CATEGORÍAS	DESCRIPCION	RANGO DE ACIDEZ O ALCALINIDAD
I	Muy ácido	Acidez Neta > 300 mg/l como CaCO_3
II	Moderadamente ácido	100 < Acidez Neta < 300 mg/l como CaCO_3
III	Débilmente ácido	0 < Acidez Neta < 100 mg/l como CaCO_3
IV	Débilmente alcalino	Alcalinidad Neta < 80 mg/l como CaCO_3
V	Fuertemente alcalino	Alcalinidad Neta > 80 mg/l como CaCO_3

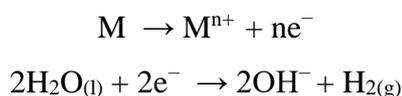
Fuente: Mollah, et al, (2011)

2.2.2. Proceso de electrocoagulación

Michael Faraday químico británico, formuló el principio del electrólisis, estableció los principios básicos del proceso de electrolisis (electroquímica) que respalda el proceso de electrocoagulación. Este proceso electroquímico en sistemas acuosos ha sido explicado por Lin,

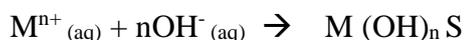
Shyu, y Sun (1986) donde la inducción causa una corriente eléctrica directa que fluye por el electrolito, originando reacciones químicas en los electrodos. Por lo común se reconoce que existen tres procesos principales: electrocoagulación (EC), electroflotación (EF) y electrooxidación (EO). Los dos sistemas primeros de electrocoagulación y electroflotación son particularmente más útiles para el tratamiento de aguas residuales aceitosas (Chen, Chang, y Hung, 2005).

Las reacciones químicas más importantes durante el proceso de (EC), en el ánodo es la disolución de cationes metálicos y en el cátodo la formación de iones de hidroxilo e hidrógeno gaseoso:



A través de un electrodo metálico transita la corriente eléctrica, oxidando el metal (M) a catión (M^{n+}). Paralelamente, el agua se reduce a hidrógeno gaseoso y el ion hidroxilo (OH^{-}). Este proceso de (EC) implanta así, cationes metálicos in situ, usando ánodos de sacrificio preferentemente hierro (Fe) y/o aluminio (Al) que requieren ser sustituidos periódicamente (Carmona, Khemis, Leclerc, y Lopicque, 2006).

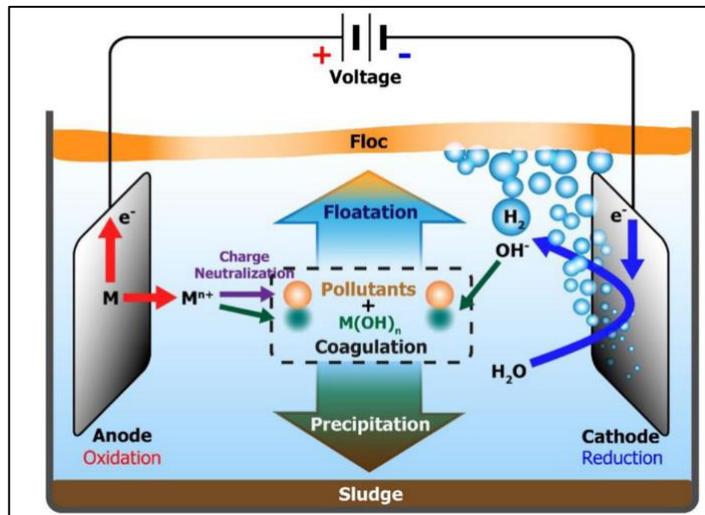
Estos cationes de Al^{3+} , Fe^{2+} , y otros desestabilizan las partículas coloidales neutralizando sus cargas. También originan especies complejas de hidróxido monomérico y polimérico como coagulantes.



La formación de coagulantes eléctricos, crean precipitados de hidróxido metálico amorfo. Sus altas propiedades de adsorción conceden una fuerte afinidad por las partículas dispersas y los contaminantes disueltos. Así, los contaminantes pueden separarse de la fase acuosa por coagulación. Estas burbujas de hidrógeno en el cátodo originan la turbulencia en el sistema y se unen con los contaminantes, reduciendo su peso específico relativo. En definitiva, se perfecciona el proceso de flotación por separación.

Figura 3

Mecanismos en el proceso de electrocoagulación



Fuente: Mollah, et al, (2011)

La técnica de (EC) es un proceso electroquímico, que, pone a cabo una modificación entre la energía eléctrica y química, que dan lugar a reacciones redox de oxidación y/o reducción, produciendo el proceso de electrólisis. La (EC) tiene como proceso desestabilizar sustancias químicas suspendidas, disueltas o emulsificadores presentes en una solución, producto de la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico, a través de un sistema cátodo/ánodo sumergido en una solución acuosa (Mollah et al., 2011).

Los procesos que ocurren durante la (EC) describen, una serie de reacciones que proporcionan tanto iones positivos como negativos en cada electrodo. Los electrodos de Al (ánodo) o Fe (cátodo), suministran iones metálicos. Al electrodo que se considere como ánodo, se le conoce como electrodo de sacrificio, ya que la placa metálica que lo conforma tiende a disolverse y la placa que forma el cátodo permanece sin disolverse. La función que cumplen los iones generados, es el de desestabilizar las partículas contaminantes en el fluido, cuando estas cargas se han neutralizado, los sistemas que conservan las partículas en suspensión desaparecen, permitiendo la formación de cúmulos contaminantes e iniciando el proceso de coagulación similar al sistema

convencional de tratamiento químico (coagulación y floculación) (Mollah et al., 2011).

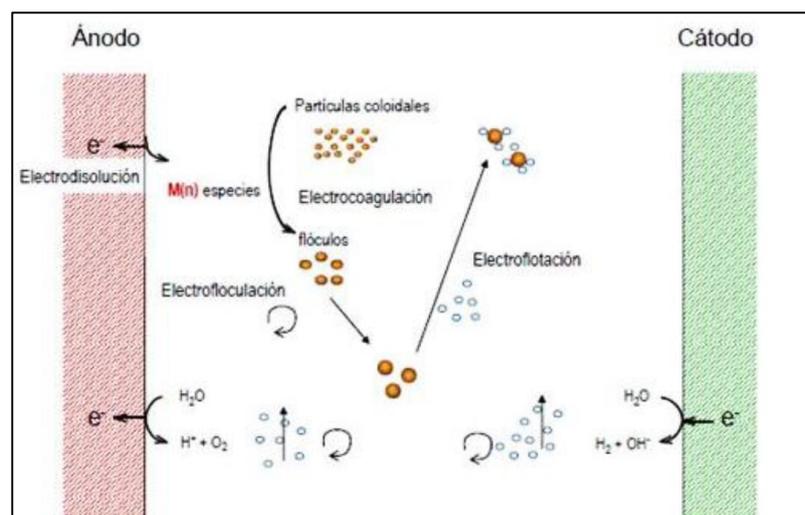
El proceso de eliminación de los contaminantes se da a partir de la liberación iones que proporcionan los electrodos y se puede dar por el proceso físico de agregación de coloides que dependiendo de su densidad pueden flotar o precipitar.

2.2.2.1. Tratamiento por electrocoagulación:

Los electrodos suministran iones dando el proceso de eliminación de contaminantes mediante dos vías: “La primera por reacciones químicas y precipitación y la segunda procesos físicos de agregación de coloides, que dependiendo de su densidad pueden flotar o precipitar” (Restrepo Mejía, Arango, y Garcés, 2006). De acuerdo a ello las reacciones más importantes que sufren las partículas contaminadas son hidrólisis, electrólisis, reacciones de ionización y formación de radicales libres.

Figura 4

Procesos involucrados en el sistema de electrocoagulación



Fuente: Gilpavas (2008).

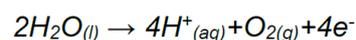
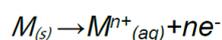
Conforme a la ley de Faraday, que rige el proceso de electrólisis, la cantidad de sustancias formadas en un electrodo

es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema, y el número total de moles de sustancia formada en un electrodo está relacionado estequiométricamente con la cantidad de electricidad puesta en el sistema. A diferencia de la coagulación química, proceso en el cual el coagulante es adicionado al sistema como agente químico, en la electrocoagulación el coagulante es formado in situ mediante las reacciones dadas por la disolución de iones del metal que conforma el electrodo de sacrificio. Según Mollah (2001), “se considera que en el proceso de electrocoagulación intervienen tres etapas: inicialmente se forma el coagulante por oxidación electrolítica del metal del ánodo, luego se da la desestabilización de los contaminantes y emulsiones y, finalmente, se produce la formación de flóculos por agregación de partículas del contaminante o adsorción de éstas en el coagulante” (p. 29).

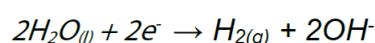
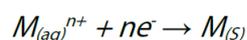
2.2.2.2. Reacciones electroquímicas en el proceso de electrocoagulación

Para Mollah et al. (2001) considera que “en una celda simple de electrocoagulación donde solo hay un ánodo y un cátodo, los cuales están hechos de un metal M, se presentan, en general, las siguientes reacciones electroquímicas”.

Reacción química de oxidación en el ánodo:



Reacción química de reducción en el cátodo:



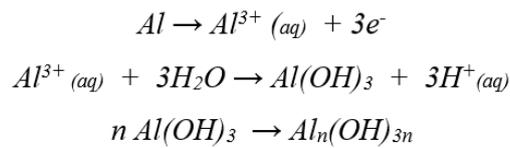
Electrodos de Aluminio

La disolución del ánodo produce especies como Al^{3+} , $Al(OH)^{2+}$, los cuales producen espontáneamente los respectivos

hidróxidos o polihidróxidos, dando una dependencia al pH en la solución iónica. Estos hidróxidos y/o polihidróxidos formados en estas reacciones presentan una gran afinidad por cada partícula e iones dispersas, lo que permitirá la coagulación.

Reacción electroquímica para el aluminio en general:

Ánodo:



Cátodo:



Los iones de Al^{3+} en mezcla con los OH^- reaccionan para formar algunas especies monoméricas como $Al(OH)^{2+}$, y otras poliméricas tales como $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{14}^{4+}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ y $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ que por procesos de precipitación forman el $Al(OH)_3(s)$, como se muestra en la reacción de ánodo. El $Al(OH)_3 (s)$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso que permite los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes (Mejía et al., 2012).

2.2.2.3. Reactor Batch

Está formado por una celda electroquímica con un ánodo y un cátodo dispuestos en forma vertical y conectada a una fuente de energía externa. (Covaleda y Hoyos, 2018).

El material anódico se corroe eléctricamente debido a la oxidación, mientras que el cátodo permanece pasivo.

El diseño formado por un par de electrodos no es el más adecuado a la hora del proceso ya que para obtener una adecuada disolución del metal se requiere de electrodos de gran área superficial, es por esta razón que se utilizan celdas con electrodos monopolares en paralelo o conectados en serie.

El sistema para la electrocoagulación requiere de una fuente de corriente directa, un regulador de densidad de corriente y de un multímetro para leer los valores de corriente.

- Dependen del contaminante a tratar.
- Dependen de la concentración de contaminante.
- El volumen de operación

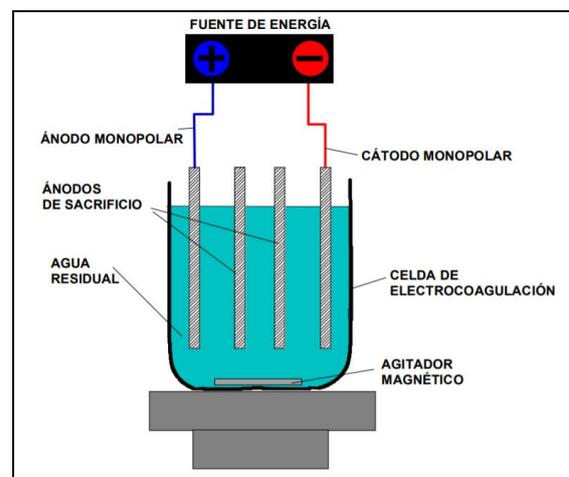
De acuerdo a Mollah, Schennach, Parga, y Cocke, (2001) consideran las siguientes configuraciones:

▪ Configuración bipolar

Estas celdas trabajan a menor intensidad ya que sólo es necesaria la conexión de dos electrodos (electrodos alimentadores), y por tanto el espacio entre los electrodos puede ser más pequeño. Sin embargo, el elevado potencial entre los electrodos alimentadores también origina que una parte de corriente fluya a través de la disolución causando un bypass de corriente a los electrodos bipolares y produciendo por tanto pérdidas de corriente, lo que debe ser tenido en cuenta a la hora de prever el efecto sobre la producción y el tiempo de vida de electrodos.

Figura 5

Configuración bipolar conectado en paralelo



Fuente: Mollah et al. (2001)

▪ **Consideraciones del material y tipo de flujo**

Tabla 5

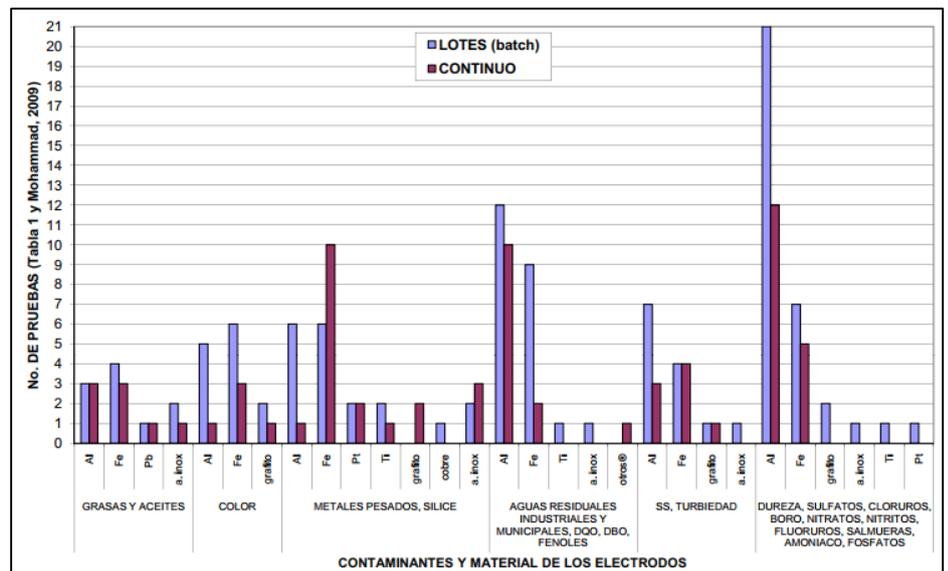
Porcentaje de remoción según material y tipo de flujo

Tipo	Contaminante		Material de electrodos		
	Orgánico	Inorgánico	Hierro	Aluminio	Otros
Lotes (batch) (%)	29.8	36.2	21.4	28.6	17.9
Continuo (%)	17	17	7.1	12.5	12.5

Fuente: Revista mexicana de Ingeniería Química (2011)

Gráfico 1

Contaminante removido según el material y tipo de flujo



Fuente: Revista Mexicana de Ingeniería Química (2011)

2.2.2.4. Operaciones en el sistema de electrocoagulación

Consumos de energía

Los consumos de energía varían entre 0.1 a 1.0 kWh/m³ dependiendo del tipo de agua a tratar (Pruton & Maron, 2006).

$$\text{costo energetico} = E * \text{costo de energía}$$

$$E = \frac{V * I * t}{V_{efR}}$$

Donde:

- E = energía consumida (kWh/m³)
- V = voltaje de la celda de electrocoagulación (Volts)

- I = intensidad de corriente eléctrica (Amperios)
- t = tiempo de retención (h)
- V_{efR} = volumen efectivo del reactor (m^3) o (1L)

De acuerdo a Aguilar (2015) considera los siguientes mecanismos:

Corrosión de electrodos

La corrosión de material está directamente relacionada con la corriente aplicada al sistema (Volts/Amperaje) y el tiempo del agua residual en el sistema de electrocoagulación. Se considera un mínimo sustitución de los electrodos de una a dos veces por cada año.

Condiciones de operación

El sistema de electrocoagulación puede funcionar de forma automática, mediante controles electrónicos que regulan la corriente y el voltaje, de acuerdo con los cambios en la calidad del agua residual a tratar, dados por su resistividad.

Producción de lodos

La generación o producción de lodos está directamente relacionado con el nivel de contaminación del agua residual y de las especies catiónicas (aluminio, hierro) que se disuelven en el agua de acuerdo con la corriente aplicada a los electrodos. En todo caso la generación de lodos es menor que un sistema químico o biológico convencional. Se obtiene un lodo más compacto (dado aluminio o hierro) con un nivel de humedad entre 97 a 99%.

En realidad, las condiciones de operación de un sistema de electrocoagulación son altamente dependientes de las condiciones químicas del medio acuoso, especialmente de la conductividad y el pH, pero también influyen el tamaño de partículas, el tipo de electrodos, el tiempo de residencia en el reactor, el espaciamiento entre los electrodos y la concentración de los contaminantes. El tratamiento general de las aguas

residuales requiere aplicaciones bajas de voltaje, generalmente de 50 Volts, con amperaje variable, de acuerdo con las características químicas del agua.

2.2.2.5. Factores que afectan la electrocoagulación:

Son muchos los factores que intervienen en el proceso de electrocoagulación y algunos de estos factores tienen mayor influencia sobre el proceso (Pretorius, et al, 2011).

pH

El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso.

Conductividad eléctrica (CE)

El aumento en la conductividad eléctrica crea a su vez un incremento en la densidad de corriente. Cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad, manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado. La adición de algunos electrólitos tales como NaCl o CaCl₂ generan un aumento en la conductividad del agua residual. Además, se ha encontrado que los iones de cloro pueden reducir los efectos adversos de iones como HCO³⁻ y SO⁴⁼ pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de Ca⁺² y Mg⁺² produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos

que aumentaría el potencial entre éstos, decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantengan cantidades de Cl^- alrededor del 20%.

Potencial oxido reducción (ORP)

Al proceso complementario de oxidación-reducción se le conoce como redox y el valor ORP es la medida en voltios o milivoltios de la actividad del electrón comparado con la actividad de un electrodo de referencia, que mantiene siempre el potencial constante. El potencial redox es una forma de medir la energía química de oxidación-reducción mediante un electrodo, convirtiéndola en energía eléctrica. El potencial redox es positivo cuando se produce una oxidación y negativo cuando se produce una reducción. Normalmente, las reacciones redox vienen acompañadas de cambios de pH en el medio.

- $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ (Oxidación de agua acidificada)
- $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ (Oxidación de agua basicada)

El valor de ORP se incrementa al incrementarse la concentración de cloro, sin embargo, un incremento regular en la concentración de cloro en ppm no origina un incremento lineal del valor en mV de ORP. De igual modo, a una concentración constante de cloro total, los valores de ORP aumentan cuando el pH de la solución es más bajo y disminuyen cuando el pH es más alto.

Solidos totales disueltos (STD)

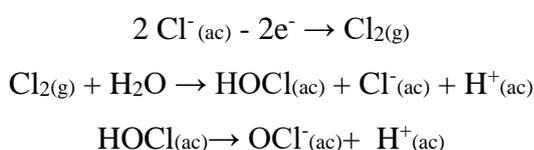
La ley de Ohm es la base para la medición de la conductividad en el agua. Esta ley define la resistencia al flujo de electricidad entre dos puntos en un circuito; una fuerza electromotriz (E) de 1 voltio hará que una corriente (I) de 1 amperio fluya contra una resistencia (R) de 1 ohm. Las concentraciones de TDS o SDT procedentes de fuentes naturales varían de 30 mg/litro a 6000

mg/litro, dependiendo de la solubilidad de los minerales en la zona geológica. Pero un estudio hecho por la Organización Mundial de la Salud OMS, menciona la recomendación de los niveles de sólidos disueltos totales TDS en el agua potable (en mg/l o PPM): 0 – 300 excelente, 300 – 600 nivel bueno, 600 – 900 nivel aceptable, 900 – 1200 nivel pobre o no recomendable y 1,200 a más inaceptable. Algunos compuestos de los TDS, como los cloruros, los sulfatos, el calcio, magnesio y los carbonatos afectan a la corrosión o incrustación en los sistemas de distribución de agua. Los niveles elevados de TDS (mayores a 500 mg/litro) provocan un exceso de incrustación en las tuberías de agua, dando así una buena relación entre la conductividad y la concentración de TDS (o salinidad).

Presencia de NaCl

La sal aumenta la conductividad del agua residual. Se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones HCO_3^- y $\text{SO}_4^{=}$, pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de Ca^{2+} y Mg^{2+} produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos que aumentaría el potencial entre éstos, decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantenga cantidades de Cl^- alrededor del 20% (Ruíz, 2014).

La presencia de sal también ayuda a disminuir el consumo de energía al aumentar la conductividad y, además, cuando hay cloruros en el agua se puede presentar las reacciones siguientes en presencia de una corriente eléctrica, lo que favorece la desinfección:



Temperatura (T)

Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy estudiados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente se incrementa inicialmente hasta llegar a 60° C, punto donde se hace máxima para luego decrecer. El aumento de la eficiencia con la temperatura es atribuido al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo.

Densidad de corriente eléctrica (DCE)

Como las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación son los parámetros que más influyen en la remoción del contaminante de un agua residual y están emparentados a factores económicos, se debe prestar mayor atención a su estudio. La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente. Para algunas conductividades del medio acuoso el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de conductividad, lo que conlleva a un consumo mayor de energía. Para altos consumos de energía se presentan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso. El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{+3} o hierros Fe^{+2} , liberados por los respectivos electrodos. En general un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante. Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación, como pH y temperatura.

$$J = \frac{I}{S} \text{ Amp}/m^2$$

Donde:

- J : Densidad de corriente eléctrica
- S : Superficie de placa
- I : Intensidad de corriente eléctrica

Velocidad angular (ω)

La velocidad de un cuerpo es una cantidad vectorial definida por su rapidez y su dirección: “Se requiere una fuerza resultante para cambiar su rapidez, y aplicar una fuerza resultante para cambiar su dirección, siempre que esa fuerza actúa en una dirección diferente de la dirección original del movimiento, ocasionando un cambio en la trayectoria de movimiento” (Bauer y Westfall, 2018, p. 653).

El movimiento más sencillo en dos dimensiones se produce cuando una fuerza externa constante actúa siempre formando ángulos rectos respecto a la trayectoria de la partícula en movimiento: “En este caso, la fuerza resultante producirá una aceleración que sólo cambia la dirección del movimiento y mantiene la rapidez constante y este tipo de movimiento sencillo se conoce como movimiento circular uniforme” (Tippens, 2010, p. 197).

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

Dónde:

- ω : velocidad angular
- $\Delta\theta$: variación de ángulo de giro
- Δt : variación de tiempo

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Contaminación de aguas en actividades mineras

La contaminación de los cuerpos de agua superficial y subterránea en las actividades mineras es originada principalmente por descarga directa e indirecta (rebalses e infiltraciones) de efluentes residuales de operaciones

mineras y procesos metalúrgicos (concentración de minerales), de drenajes de áreas de acumulación de residuos así como de talleres y de aguas servidas de campamentos. Los cuerpos de agua pueden ser fisicoquímicamente alterados; efectos como el incremento de acidez, elevadas concentraciones de metales pesados y reactivos, materiales en suspensión, efectos en los sedimentos del fondo. Los efectos son generalmente adversos y limitan el uso de los cuerpos de aguas contaminadas, afectando directamente a la vida acuática a los humanos y animales a consumir agua contaminada.

Los residuo mineros metalúrgicos, es el flujo de contaminación química inorgánica a aguas superficiales, aguas subterráneas y suelos, que se origina por el efecto de la exposición de rocas y residuos minero metalúrgicos sulfurosos a condiciones de oxidación en la intemperie, por precipitación atmosférica, o por aguas superficiales; esta oxidación conducirá a la formación de ácido sulfúrico que incrementa la lixiviabilidad de los metales existentes en los residuos minerometalúrgicos, las concentraciones reales de metales en el DAR están regidas por factores dependientes del lugar, como flujo de aireación, bacterias oxidantes, flujo de agua y presencia de agentes neutralizantes. Es por ello, para poder prever las descargas futuras de metales de los desmontes, colas de concentración y otros residuos de actividades mineras, es necesario investigar todos los parámetros relevantes del material que influyen en los procesos de oxidación y lixiviación (PNUMA, 1994).

El programa de las naciones unidas para el medio ambiente (PNUMA), menciona que, dependiendo de la clase de desarrollo y operación minera, de la clase de procesamiento de plantas de pre concentración y concentración de minerales, de la clase de tratamiento hidrometalurgico y procesos piro metalúrgicos, y de disponibilidad de agua en la región, los contaminantes pueden ser orgánicos e inorgánicos. Los contaminantes de efluentes de plantas de procesamiento a los cuerpos de agua de las proximidades, son en términos generales, los reactivos:

ácidos, álcalis, colectores y espumante, modificadores de superficie, activadores, depresores, floculantes, coagulantes, dispersores, cianuro como depresor de sulfuros de hierro o para la cianuración de metales preciosos, mercurio en proceso de amalgamación. Los contaminantes inorgánicos incluyen sales minerales (cloruros sulfatos, carbonatos) y las denominadas sustancias tóxicas como son algunos insumos (cianuro, mercurio, nitrato de plomo, ácidos y álcalis fuertes, etc), y metales pesados, provenientes de minerales, tales como Oro (Au), plata (Ag), Bismuto (Bi), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Arsénico (As), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Magnesio (Mg), Estaño (Sn), Teluro (Te), Selenio (Se), Vanadio, Wolframio (W) y Zinc (Zn). Además de estos constituyen la concentración de gases disueltos, especialmente oxígeno e ion hidrógeno (expresado como pH) que son importantes en el cambio (a veces irreversible) y contaminación de agua (PNUMA, 1994).

2.3.2. Electrocoagulación

La electroquímica es una rama de la electroquímica dedicada al estudio de la interacción y correlación de los procesos químicos y eléctricos mediante las reacciones de óxido/reducción. Las principales técnicas electroquímicas son la electrodiálisis, electrocoagulación, electroflotación y la oxidación directa e indirecta. La electrocoagulación es un proceso que implica varios fenómenos químicos y físicos, usa electrodos para proveer iones metálicos (Mn^+) al agua residual a tratar. En esta técnica el coagulante es generado 'in situ' debido a una reacción de oxidación del ánodo, y las especies cargadas o metales pesados pueden ser removidos del efluente debido a la reacción entre iones con carga opuesta o debido a la formación de flóculos de hidróxidos metálicos (Gillpavas, 2008).

La electrocoagulación, considerada una tecnología, ha evolucionado, siendo eficazmente aplicada en la actualidad para el tratamiento de aguas residuales de la industria del papel, la minería y la industria de metales pesados. Además, la electrocoagulación se ha aplicado para tratar agua

que contiene pérdida de alimentos, grasas, tintes, partículas suspendidas, entre otros. Sobre el particular, la electrocoagulación se convierte en un proceso electroquímico que puede tener resultados exitosos en su aplicación, optimizando los factores que lo conforman, alcanzando el reto de proteger, conservar y recuperar el recurso hídrico (Arango, 2005). Electrocoagulación produce una serie de reacciones redox que ocurren al interior de una celda electrolítica donde la coagulación y desestabilización de coloides ocurren simultáneamente, este proceso que utiliza la electricidad para eliminar contaminantes en el agua que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificados. La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Por lo general este estado estable produce partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas o solubles. Si 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 (Jiménez & Real, 2013).

La coagulación asistida electroquímicamente (electrocoagulación) la cual se define como un proceso efectivo para desestabilizar finamente las partículas dispersas en el agua natural o residual, usualmente se utilizan electrodos (ánodos o electrodos de trabajo y cátodos o electrodos inertes) de hierro o aluminio en este proceso, y cuando se aplica corriente eléctrica los ánodos producen iones de hierro (Fe^{2+}) o (Al^{3+}), estos iones generados electroquímicamente son buenos coagulantes y pueden hidrolizarse cerca del ánodo para producir una serie de intermediarios activados que son capaces de desestabilizar las partículas dispersas presentes en el agua, las partículas desestabilizadas se unen para formar flocs. Del mismo modo las pequeñas burbujas de hidrógeno generadas en el cátodo por hidrólisis del agua hacen flotar a los flocs formados

facilitando la separación de partículas del agua residual. Los gases generados en los electrodos (hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo) originan una suspensión coloidal (espuma) en la superficie, cuyas burbujas son muy estables (Robles & López, 2017).

2.3.3. Coagulación

El proceso de la coagulación es el fenómeno químico y la floculación es el fenómeno físico. La coagulación se fundamenta en la desestabilización de las partículas coloidales causadas por la adición de un reactivo químico que neutraliza sus cargas electrostáticas, disminuye las fuerzas de atracción entre ellas, se aglomeran y luego decantan. Los coagulantes químicos más utilizados para promover la agregación de partículas son los basados en hierro (sulfato ferroso y el cloruro férrico) o aluminio (sulfato de aluminio o alúmina). Los coagulantes pueden presentar desventajas como incrementar los sulfatos en el agua y formar flóculos más difíciles de sedimentar en el caso de la alúmina, o aumentar la concentración de cloruros en el agua y pH ácidos en el caso del cloruro férrico. Las partículas sólidas de dimensiones menores a dos micrómetros ($2\mu\text{m}$), contenidas en las aguas son denominados arcillas, y en ellas se encuentran los coloides cuyos tamaños oscilan entre los $0,2\mu\text{m}$ a $0,5\mu\text{m}$, de modo que no toda las arcillas son estrictamente coloides, cuya forma puede ser laminar sobre cuyas superficie externas son adsorbidos ciertos iones los que rodean a la partícula coloidal impartiendoles cierta carga al coloide, de manera que a cierta distancia es rodeada por otra capa de partículas de carga opuesta y así hasta que la fuerza electrostática se desvanece con la distancia.

Tipos de Coagulación

Se presentan dos tipos básicos de coagulación: Por Adsorción y por Barrido (Fynde, 2018).

a) Coagulación por adsorción

Se presenta cuando el agua presenta una alta concentración de partículas al estado coloidal; cuando el coagulante es adicionado al

agua turbia los productos solubles de los coagulantes son absorbidas por los coloides y forman los flóculos en forma casi instantánea.

b) Coagulación por barrido

Este tipo de coagulación se presenta cuando el agua es clara (presenta baja turbiedad) y la cantidad de partículas coloides es pequeña; en este caso las partículas son atrapadas al producirse una sobresaturación de precipitado de sulfato de aluminio o cloruro férrico.

2.3.4. Floculación

La floculación es el proceso mediante el cual se aglutinan o reúnen los compuestos desestabilizados (floculo) presentes en una solución. En la floculación intervienen diferentes procesos de transporte y se considera que la aglutinación se produce por coaliciones. Para lograr una floculación óptima se suelen utilizar productos como coadyuvantes, los más utilizados son los polielectrolitos y la cal. La cal tiene poder floculante, pero también es utilizada para darle un pH óptimo a la solución, mientras que los polielectrolitos son utilizados cuando la solución posee una baja turbiedad, es decir, cuando los coloides son muy pequeños. Los polielectrolitos no se utilizan como coagulantes únicos por el costo de los mismos y la cal por el elevado incremento del pH (Lorenzo, 2009).

Tipos de Floculación

- a) **Floculación pericinética:** Se debe a la energía térmica del fluido, colisiones causadas por el movimiento de las moléculas de tipo Browniano, significativa para partículas menores a 1 ó 2 μm .
- b) **Floculación ortocinética o gradiente de velocidad:** Colisiones causadas por el movimiento del fluido.
- c) **Sedimentación diferencial:** Se debe a las partículas grandes, que, al precipitarse, colisionan con las más pequeñas, que van descendiendo lentamente, y ambas se aglomeran.

Los compuestos que pueden estar presentes en la solución pueden ser:

- Sólidos en suspensión.
- Partículas coloidales (menores a 2 micras), gobernadas por el movimiento browniano.
- Sustancias disueltas.

El rango de pH óptimo para la formación de un flóculo de hidróxido de aluminio es entre 5.5 y 7.8. Para estos valores de pH el flóculo es insoluble (Carro, 2009).

2.4. Definición de términos

Anión

Especie iónica negativa que migra hacia el cátodo por efecto de un campo eléctrico (Lee, 2005).

Ánodo

Electrodo hacia donde migran los aniones y en donde se produce una reacción de oxidación y está conectado al terminal positivo de la fuente de corriente directa (Cabrera y Martínez , 2012).

Catión

Especie iónica positiva que migra hacia el cátodo por efecto de un campo eléctrico (Cabrera & Martínez , 2012).

Cátodo

Electrodo hacia donde migran los cationes y en donde se produce una reacción de reducción y está conectado al terminal negativo de la fuente de corriente directa (Cabrera y Martínez , 2012).

Celda Electroquímica

Dispositivo donde ocurre una reacción química de oxidación o de reducción. La celda consiste, fundamentalmente, en dos conductores llamados electrodos, en contacto con una solución adecuada de un electrolito. Cuando los dos conductores son conectados, a través de un circuito eléctrico externo, una corriente eléctrica fluye entre ellos proporcional a la diferencia de potencial existente entre ellos (Martínez y Hernández, 2005).

Celdas electrolíticas

Son aquellas celdas electroquímicas en las que se incita una reacción química no espontánea mediante el uso de la energía eléctrica procedente de alguna fuente eléctrica externa (Martínez y Hernández, 2005).

Cinética de adsorción

Describe la velocidad de atrapamiento del adsorbato (solute), lo cual controla el tiempo de residencia de este en la interface solido-disolución con lo que se puede predecir la velocidad a la cual el contaminante se remueve del efluente tratado (Pinzón y Vera, 2010).

Conductividad eléctrica:

Es la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica. Semejante a la conductividad térmica, aunque ambos tipos de conductividad se presentan generalmente juntos (Martínez y Hernández, 2005).

Coagulación

Se considera como la desestabilización de las partículas con carga eléctrica para conseguir que las fuerzas de atracción tipo Vander der Walls que existen entre dos partículas predominen sobre las de repulsión electrostática, logrando que estas se unan y formen sólidos de mayor tamaño (Martínez, 2008).

Coagulación química

Es un proceso donde los componentes de una suspensión o disolución estable son desestabilizados por superación de las fuerzas que mantienen su estabilidad (Aguilar et al., 2002). La desestabilización preliminar y la agregación del coloide y materia suspendida se logran por la adición de un producto químico para la formación de flóculos (Cabrera, Fleites, y Contreras, 2009).

Corriente eléctrica

Es el Flujo de cargas causado por el desplazamiento del movimiento de cargas eléctricas (ion o electrón) debido a una diferencia de potencial (Martínez y Hernández, 2005).

Densidad de corriente

Es una magnitud que describe el movimiento promedio de las cargas en un material por unidad de área, expresado generalmente en amperios por metro cuadrado (Chang, 2007).

Electrodo

En términos generales es un elemento conductor de electricidad que cierra un circuito y entre cuyos extremos se establece una diferencia de potencia. Desde la concepción electroquímica, se considera un conductor de electricidad que establece el contacto eléctrico entre un circuito externo, conectado a otros electrodos, y una solución electrolítica (Chang, 2007).

Electrolitos

Son sustancias que contienen iones libres (o polares) que conducen la energía eléctrica y que se descomponen en iones (ácidos, bases y sales); ya sea en soluciones líquidas o al ser fundidos (al estado líquido) (Chang, 2007).

Electrocoagulación

Es un proceso electroquímico, a partir de compuestos procedentes de la disolución de un ánodo, se agrupa la materia coloidal existente en un agua residual, viabilizando su separación de agua mediante técnicas convencionales de separación sólido-líquido, decantación y flotación). Como resultado de su disolución, los ánodos van desapareciendo (ánodos de sacrificio), conforme transcurre el tiempo, el tratamiento va llegando a un momento en el que es necesaria su reposición (Cañizares, Sáez, Lobato, y Rodrigo, 2004).

Fuente de energía

Para ejecutar el proceso de electrólisis se usan generadores de corriente continua (C.C.) que pueden ser baterías o pilas conectadas en serie.

El rectificador es capaz de convertir corriente alterna en continua; también tiene un variador de voltaje (V), y un amperaje(A) independientes entre sí. El voltaje se deja fijo, y debe ser regulado el amperaje, por ser este el que determina la migración de especies catiónicas del ánodo para que se produzca la electrolisis del agua, de esta manera se está generando OH^- y acelerando las reacciones de óxido y reducción (proceso redox) (Rodríguez, 2018).

Floculo

Se conoce como flóculo al conjunto de partículas pequeñas aglutinadas en partículas más grandes y con mayor capacidad de sedimentación que se obtiene mediante tratamiento químico, físico o biológico. Compuesto insoluble que adsorbe materia coloidal y permite su fácil sedimentación. (Aguamarket, 2018).

Ion

Especie de átomo o molécula cargada. Se llama catión cuando es positiva y anión en caso contrario (Chang, 2007).

Isotermas de adsorción

La isoterma de adsorción es la relación de equilibrio entre la concentración del adsorbato en la fase fluida y la concentración del mismo en las partículas de adsorbente a una temperatura determinada y constante. La capacidad de adsorción está definida en base a las isotermas de adsorción en disolución. (Pinzón y Vera, 2010).

Metales pesados

Son un grupo de elementos metálicos tóxicos de alto peso atómico como el arsénico, cromo, cobre, plomo, mercurio, plata y zinc. Son dañinos para los seres vivos a bajas concentraciones y tienden a acumularse en la cadena alimenticia (Londoño, Londoño, y Muñoz, 2016).

2.5. Formulación de hipótesis

2.5.1. Hipótesis general

El diseño de un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el tratamiento de las aguas acidas mineras.

2.5.2. Hipótesis específico

- a.** El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el control del pH en el tratamiento de aguas acidas mineras.
- b.** El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el control del ORP en el tratamiento de aguas acidas mineras.
- c.** El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el control de la CE en el tratamiento de aguas acidas mineras.

- d. El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el control de los STD en el tratamiento de aguas acidas mineras.

2.6. Identificación de variables

Variable Independiente (causa):

- Sistema de electrocoagulación:

Densidad de CE

- 5.21 Amp/m²
- 15.63 Amp/m²
- 26.04 Amp/m²

Velocidad angular

- 30 rpm
- 60 rpm
- 90 rpm
- 120 rpm

Tiempo

- 05 min
- 15 min
- 25 min

Variable Dependiente (efecto):

- Aguas acidas mineras:
 - pH
 - ORP
 - Conductividad eléctrica (CE)
 - STD (Solidos Totales Disueltos)

2.7. Definición operativa de variables e indicadores

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍNDICES	INSTRUMENTO
VARIABLE INDEPENDIENTE:				
<ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento de Aguas Acidas <p>Definición Operacional</p> <p>Es el proceso de tratamiento de los DAM (drenaje ácido de mina), mediante la aplicación de la tecnología de electrocoagulación, el agua tratada se concentrará de acuerdo a los LMP de efluentes mineros en los rangos establecido en el Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM.</p>	pH	Acido	≤6.5	El pH-metro
		Neutro	7.0	
	Alcalino	≥7.5		
	ORP	mV	650-800	Multímetro
	CE	μS	1000 - 2000	Multiparametro
	STD	μS/cm	650 - 700	Multiparametro
VARIABLE DEPENDIENTE:				
<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de electrocoagulación <p>Definición Operacional</p> <p>Se constituye la estimación de la eficiencia del equipo de electrocoagulación por medio de electrodos móviles (RPM) de sacrificio llamados ánodo y cátodo que interactúa a una distancia de 10 cm entre placas de aluminio a voltajes, densidades de corriente eléctrica y amperajes continuos en intervalos de tiempos establecidos.</p>	Densidad de Corriente Eléctrica	5.21 A/m ²	Bajo	Fuente de Poder
		15.63 A/m ²	Medio	
		26.04 A/m ²	Alto	
	Tiempo de retención	5 minutos	Bajo	Cronometro
		15 minutos	Medio	
		25 minutos	Alto	
	Velocidad angular	30 rpm - 60 rpm	Bajo	Velocímetro
		60 rpm - 90 rpm	Medio	
		90 rpm - 120 rpm	Alto	

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de la investigación

De acuerdo con los propósitos inmediatos que persigue la investigación es de tipo aplicada. Según Tamayo, (2005), Se refiere; “a resultados inmediatos y se halla interesada en el perfeccionamiento de los individuos implicados en el proceso de la investigación, busca confrontar la teoría con la realidad. porque se ocupa de la solución de problemas prácticos, dentro de la aplicación de la ciencia” (p. 43).

La Investigación permitirá identificar y cuantificar las causas de los efectos dentro del estudio de las variables de estudio y permitirá responder a las interrogantes formuladas en la investigación.

3.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación es de tipo explicativo. Según Niño Rojas, (2011); “es casi que el objetivo final, la meta o la exigencia, ya que busca respuesta a una pregunta fundamental, por el deseo de conocer y saber del ser humano” (p. 34). La presente investigación, busca resolver problemas prácticos, con un margen

de generalización limitado y permitirá trabajar a escala de laboratorio con el fin de optimizar la eficiencia del estudio de investigación.

3.3. Método de investigación

3.1.1. Método general

El método experimental, garantiza llegar al verdadero conocimiento de la realidad. Para Ramírez (2009), el considera; “que el conocimiento debe partir de la observación de las características contenidas en ella, independientes de las opiniones que podamos formular, para ello hacemos uso de las reglas de la percepción, que nos permite, mediante el razonamiento, descubrir cómo son real y verdaderamente las cosas” (p. 189). En este sentido se buscó establecer posibles relaciones de causa-efecto, exponiendo al grupo experimental a un tratamiento para obtener diferencias significativas y analizar estos resultados.

3.1.2. Método específico

El método comparativo, consiste en la generalización empírica y la verificación de la hipótesis. La posibilidad de explicarlas o interpretarlas, perfilar nuevos conocimientos, destacar lo peculiar de fenómenos conocidos, sistematizar la información distinguiendo las diferencias con fenómenos o casos similares (Díaz de León, 2012, p. 223).

Los métodos detallados nos permitieron repetir las observaciones en las mismas condiciones para analizar los resultados y también variar las condiciones para ver las diferencias y replicar el experimento. Este efecto admitió la manipulación de la variable independiente (sistema de electrocoagulación) y se dispuso del máximo control sobre ellas, mediante el razonamiento hipotético - deductivo para contrastar la hipótesis y así validar su veracidad o no.

3.4. Diseño de investigación

3.4.1. Diseño general

La investigación presenta un diseño pre experimental, en razón de que no tienen la capacidad de controlar adecuadamente los factores que

influyen contra la validez interna, así como también de la validez externa. Sin embargo, es útil comenzar la discusión y descripción de los diseños por dos razones: primero porque son elementos de los diseños experimentales, segundo porque ilustran la forma en que las variables extrañas pueden influir en la validez interna, es decir nos dan a conocer lo que no se debe de hacer y lo que se deberá hacer (Sánchez, Reyes y Mejía, 2018).

3.4.2. Diseño específico

Se utilizó el diseño pre test y pos test con un solo grupo. Según Sánchez, Reyes y Mejía (2018) “usa un pre-test, de algún modo proporciona información acerca de la muestra con la que se realiza el estudio y de esta forma se estaría controlando de algún modo la selección de la variable extraña” (pp. 87-88). El diseño de investigación comprendió el siguiente modelo:

GE : O1 X O2

Donde:

GE : Grupo Experimental

O1 : Pre test (pH, ORP, STD, CE)

X : Variable experimental (VI): Sistema de electrocoagulación

O2 : Pos test (pH, ORP, STD, CE)

La ejecución de este diseño implicó tres pasos a ser realizado:

- Una medición previa de la variable dependiente a ser estudiada (pre-test).
- Introducción o aplicación de la variable independiente o experimental “X” a los sujetos del grupo “Y”.
- Una nueva medición de la variable dependiente en los sujetos (pot-test).

3.5. Población, muestra y muestreo

3.5.1. Población

Se entiende por población o universo a la totalidad de elementos o unidades de análisis (Vasquez, 2016).

La población está representada por la generación de los Drenajes Ácidos Mineros (DAM) de la mina Milpo de Huancavelica.

3.5.2. Muestra

Son aquellas que se define como el listado de elementos, unidades de análisis, a partir del cual se seleccionó (Velazquez, 2016).

La muestra a analizar presenta 01 litros que viene a ser la generación de los Drenajes Ácidos Mineros (DAM) de la mina Milpo de Huancavelica debido a las dimensiones del sistema de electrocoagulación a escala de laboratorio. Se realizó 36 tratamientos con 2 réplicas de acuerdo a las velocidades de giro programados.

3.5.3. Muestreo

El muestreo para las pruebas experimentales fue no probabilístico y por conveniencia, también llamadas muestras dirigidas, que suponen un procedimiento de selección orientado por las características de la investigación, más que por un criterio estadístico de generalización (Hernández, 2014). El centro minero Pukaqaqa - Milpo ubicado en la subcuenca del río Palca, y las quebradas Machay Pampa y Callqui cuenta con una poza de sedimentación de lodos por cada plataforma con dimensiones de 4 x 2 x 1.5 m (12 m³) recubiertas por geomembrana HDPE (1.0 mm) y producto de las perforaciones que realizan en diferentes puntos del proyecto de acuerdo al componente de la mina y según al tipo de roca se requiere una cierta cantidad de agua para las perforaciones y los sondajes de perforación que se realizan en rocas muy fracturadas no tienen retorno de lodo lo que sustentan el muestreo intencional.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.6.1. Técnicas de recolección de datos

La observación experimental

Es el registro sistemático y válido de datos e informaciones de los hechos observados (Ñaupas, Mejía, Novoa, y Villagomez, 2014). Es fundamentalmente sistemática, objetiva y posee los mecanismos de

control que impiden caer en algunos errores propios de la subjetividad, de la ambigüedad y la confusión (Niño, 2011).

Esta observación que se realizó en la investigación experimental, mediante el uso del método experimental, consistió en examinar atentamente el efecto que produce la manipulación de la variable independiente (sistema de electrocoagulación) sobre la variable dependiente (Tratamiento de aguas acidas mineras). Además, se examinan las características del comportamiento de los fenómenos y efectos de los indicadores de las variables (tiempo, densidad de corriente eléctrica y velocidad angular), en el experimento.

3.6.2. Instrumentos de recolección de datos

Ficha de registro de campo

Como afirma Ñaupas & Mejía (2014), se empleó como instrumento de recolección de datos una ficha técnica que consistió en: “Observar atentamente el fenómeno, hecho o caso, tomar información y registrarla para su posterior análisis” (p. 45).

Se realizará en base Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM que establece los Límites Máximos Permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas. La observación experimental se efectuó en un ambiente adecuado tipo laboratorio debido a la pandemia COVID - 19, que consistió en observar atentamente los efectos, producido por el sistema de electrocoagulación (EC) a intervalos de tiempos, densidades de corriente eléctrica y velocidades de giro que fueron registradas en la ficha de registro de campo.

Las opciones de recojo de información de los parámetros de estudio se realizó en las fichas de registro de campo de pre test y pos test con 36 tratamientos y 02 réplicas de acuerdo a las velocidades programadas.

3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

3.7.1. Técnica de procesamiento de datos

Este diseño se llama completamente al azar (DCA) porque todas las corridas experimentales se realizan en orden aleatorio completo. De esta

manera, si durante el estudio se hacen en total N pruebas, éstas se corren al azar, de manera que los posibles efectos ambientales y temporales se vayan repartiendo equitativamente entre los tratamientos. De acuerdo a los datos obtenidos en el proceso de laboratorio, y las hipótesis tanto generales y específicas planteadas, la investigación se enfocó en realizar una matriz de DCA con arreglo factorial que consiste en determinar un conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores. El diseño de la investigación comprende 3 factores de análisis (densidad de corriente eléctrica, tiempo y velocidad angular), con 3 niveles de aplicación para los 2 primeros factores y 4 niveles para el tercer factor, que dan lugar al diseño factorial $3 \times 3 \times 4$. Para obtener el número de corridas experimentales se multiplica el número de tratamientos por el número de réplicas que son 2, donde una de éstas se lleva a cabo cada vez que se corre el arreglo completo. Las corridas experimentales de acuerdo a los tratamientos de laboratorio y observación, dando lugar al modelo de arreglo factorial de $3 \times 3 \times 4 \times 2$, lo cual representa 72 corridas experimentales de tratamiento respecto a los parámetros fisicoquímicos en estudio.

En caso de que los tratamientos tengan efecto, las observaciones Y_{ij} se podrán describir con el modelo estadístico lineal dado por; $Y_{ij} = m + t_i + e_{ij}$ donde “ m ” es el parámetro de escala común a todos los tratamientos, llamado media global, “ t_i ”; es un parámetro que mide el efecto del tratamiento “ i ” y “ e_{ij} ” es el error atribuible a la medición Y_{ij} . Este modelo (efectos fijos) implica que en el diseño completamente al azar actuarían a lo más dos fuentes de variabilidad: los tratamientos y el error aleatorio. Para determinar la diferencia que deben tener las medias entre sí para concluir que hay un efecto (que los tratamientos son diferentes), nos lo dice el análisis de varianza (ANVA). El análisis de varianza (ANVA) es la técnica central en el análisis de datos experimentales.

La idea general de esta técnica es separar la variación total en las partes

con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento. En el caso del DCA se separan la variabilidad debida a los tratamientos y la debida al error. Cuando la primera predomina “claramente” sobre la segunda, es cuando se concluye que los tratamientos tienen efecto o, dicho de otra manera, las medias son diferentes. Cuando los tratamientos no dominan contribuyen igual o menos que el error, por lo que se concluye que las medias son iguales.

El uso de supuestos de normalidad y homocedasticidad se consideró a la prueba de Shapiro-Wilk que es una de las más consolidadas y con mayor potencia estadística entre las existentes actualmente (Arcones y Wang, 2006). Su fundamento estadístico está basado en una gráfica de probabilidad en la que se considera la regresión de las observaciones sobre los valores esperados de la distribución hipotetizada, en donde su estadístico W representa el cociente de dos estimaciones de la varianza de una distribución normal.

El nivel de significancia, aplicado a la prueba de normalidad se utilizó la prueba de Bartlett que, es una modificación del test de Neyman y Pearson para “corregir el sesgo”; esta prueba es la que se utiliza con más frecuencia para probar la homogeneidad de las varianzas. En esta prueba los n_i en cada tratamiento no necesitan ser iguales; sin embargo, se recomienda que los n_i no sean menores que 3 y muchos de los n_i deben ser mayores que 5 (Correa, Iral, y Rojas, 2009).

Conforme a las inferencias detalladas, la investigación comprobó las hipótesis planteadas analizando los efectos principales, interacción de factores y la ecuación de regresión lineal. Las variables de respuesta fueron los porcentajes de remoción y tratamiento de los parámetros pH, ORP, CE y STD. Dentro de las variables que se consideraron como factores para el diseño experimental fueron:

- ✓ Densidad de corriente eléctrica.
- ✓ Tiempo de tratamiento (remoción).
- ✓ Velocidad angular.

El modelo de efectos fijos comprendió la misma estructura para los cuatro parámetros motivo de estudio:

Para: pH, ORP, Conductividad y STD

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \theta_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\beta\theta)_{jk} + (\alpha\theta)_{ik} + (\alpha\beta\theta)_{ijk} + (\varepsilon)_{ijk}$$

Dónde,

- Y_{ijk} : es la i-ésima observación del porcentaje de remoción de pH observado en los niveles i, j y k de los factores, intensidad de corriente, tiempo y velocidad angular.
- μ : es el porcentaje medio de remoción de los parámetros.
- α_i : es el efecto del i-ésimo nivel del factor densidad 5.21, 15.63 y 26.04 A/m².
- β_j : es el efecto del j-ésimo nivel del factor tiempo k = 5, 15, y 25 min.
- $(\alpha\beta)_{ij}$: es el efecto de interacción entre los niveles i y j de los factores densidad y tiempo. *Para todo i, j*
- $(\alpha\gamma)_{ik}$: es el efecto de interacción entre los niveles i y k de los factores densidad y velocidad angular. *Para todo i, k*
- $(\beta\gamma)_{jk}$: es el efecto de interacción entre los niveles j y k de los factores tiempo y velocidad angular. *Para todo j, k*
- $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$: es el efecto de interacción entre los niveles i, j y k de los factores densidad, tiempo y velocidad angular. *Para todo i, j, k*
- $(\varepsilon)_{ijk}$: es el i-ésimo término de error aleatorio de los 3 factores.

3.7.2. Análisis de datos

Los datos procesados estadísticamente se textualizaron mediante el uso de la hermenéutica, técnica a través del cual; se procedió con la descripción y explicación literal de los resultados que se ha obtenido. Consistió en procesar los datos obtenidos de la muestra mediante los programas estadísticos Rstudio v-4.03 y Excel v-2020 como objeto de estudio durante el trabajo a escala de laboratorio, y tiene como fin generar resultado (datos agrupados y ordenados), a partir de los cuales se

realizará el análisis según la hipótesis de la investigación realizada mediante pruebas estadísticas.

3.8. Descripción de la prueba de hipótesis

Consistió en procesar los datos obtenidos de la muestra mediante los programas estadísticos Rstudio V-4.03 y Excel V-2020 como objeto de estudio de la siguiente manera.

Paso 1: Se seleccionó el programa Excel v-2020 que mediante una ficha de registro de campo de pre test y pos test se registró el análisis de recojo de información de los análisis de los parámetros pH, ORP, CE y STD observados respecto a los factores de densidad de corriente eléctrica, tiempo y velocidad angular.

Paso 2: Seguidamente se organizó los datos en una matriz de arreglo factorial en base a un DCA en el programa Excel de la forma $3 \times 3 \times 4 \times 2$ (3 niveles del factor densidad, 3 niveles del factor tiempo, 4 niveles del factor velocidad angular y 2 tratamientos o replicas) para su respectivo proceso en el programa Rstudio v-4.03.

Paso 3: Se realizó el análisis de prueba de normalidad de datos con el test estadístico de Shapiro - Wilk de los parámetros de pH, ORP, CE y STD.

Paso 4: Se realizó la prueba de homogeneidad de varianza aplicando el estadístico de Bartlett.

Paso 5: Se generó el ANVA con arreglo factorial de las 3 semanas con 45 tratamientos.

Paso 6: Se procedió a generar las gráficas de efectos principales e interacción de factores conjugando con las 72 corridas o replicas.

Paso 7: Por último, se realizó el análisis de valores ajustados y reales de los tratamientos del pH, ORP, CE y STD. Estos resultados, según los objetivos e hipótesis planteadas en la tesis de investigación, fueron contrastadas mediante la prueba de hipótesis que se detalla en el capítulo IV.

CAPÍTULO IV

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Presentación e interpretación de datos

4.1.1. Descripción de la presentación de datos

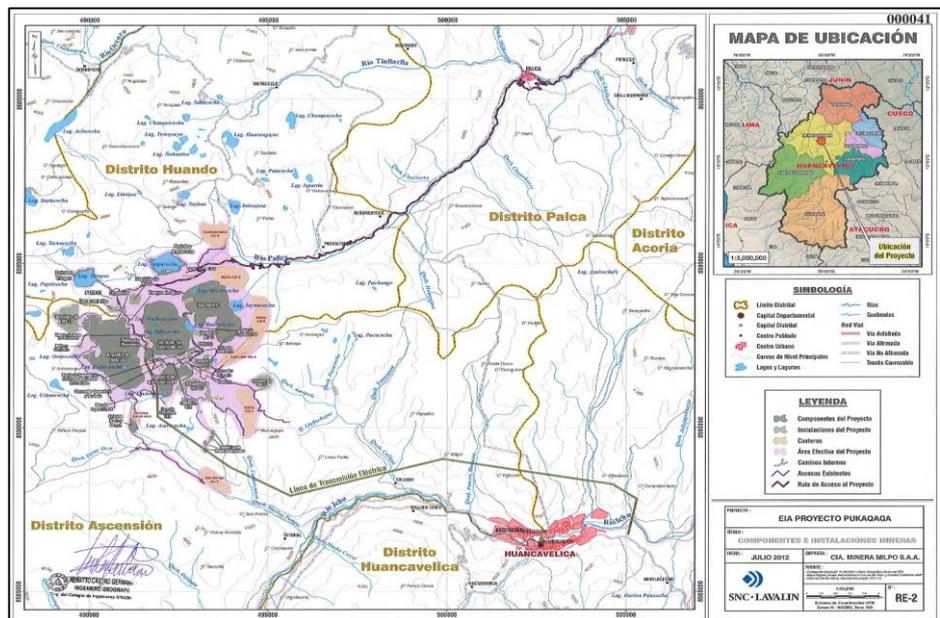
Los procesos de estimación de resultados de la investigación fueron efectuados en primer nivel a partir de ensayos experimentales a escala de laboratorio. En segundo nivel se realizó la recolección de datos, en base a la hoja de cálculo del programa Excel v-2020 dando a la base de datos la estructura de un diseño experimental complemente aleatorizado (DCA). En tercer nivel se efectuó el procesamiento estadístico (descriptivo e inferencial) de la base de datos del DCA con el software Rstudio v-4.03. Los niveles de análisis y procesos estadísticos descriptivos nos permitieron analizar y estimar la eficiencia del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles, basados en los parámetros de estudio y tratamiento del pH, ORP, CE y STD. Los procesos estadísticos inferenciales, permitió evaluar la variación y estimación de la variable respuesta (pH, ORP, CE y STD) y la contrastación de Hipótesis, trabajando a un nivel de significancia de un 5%, con una prueba de normalidad bajo el test de Shapiro-Wilks, prueba de

homogeneidad de varianza (Bartlet) y la prueba ANVA (DCA) con arreglo factorial de; 3 factores con niveles variables y 2 tratamientos acorde al algoritmo de $(3 \times 3 \times 4 \times 2)$. De igual modo se realizó un análisis de regresión lineal, para determinar una ecuación lineal predictor, seguidamente de una optimización de datos de la variable respuesta y la predicción real y ajustada de los 72 tratamientos en intervalos de confianza.

4.1.2. Ubicación y descripción de la zona del proyecto

Figura 6

Mapa de ubicación de la zona de estudio



Fuente: EIA Milpo (2012)

La figura 6 muestra la zona de estudio está ubicada en los distritos de Ascensión y Huando de la provincia y región de Huancavelica de la sierra central del país a 11 km al NO de la ciudad de Huancavelica a una altitud entre los 4,200 y 4,860 msnm. Particularmente el área de mineralización se desarrolla desde las coordenadas UTM 493,000 E hasta 494,300 E y 8,593,000 N a 8,594,500 N. El foco aproximado del grupo de autorización se encuentra entre 493,426 E y 8,593,383 N. Los procesos unitarios proyectados como el tajo abierto, el depósito de desmontes, planta de procesos, y los embalses para conservación de aguas llamados

Tutayoc y Ampacocha, entre otros componentes menores se ubican en la subcuenca del río Pallca entre las comunidades campesinas de Pueblo Libre, Palca y Pachachaca. Entre las comunidades campesinas de Pastales Huando, Pueblo Libre, Totoral Chico y Totoral Grande se ubica la subcuenca de Machay Pampa. La subcuenca contempla la construcción del depósito de relaves, una sección del depósito de desmonte y un embalse de agua en el cauce de la quebrada Machay Pampa.

4.1.3. Análisis de Datos

Resultados del pre test

Comprendió la medición preliminar del análisis de los parámetros pH, ORP, CE y STD donde las muestras simples fueron recogidas en el efluente de los depósitos de relave minero de la mina Milpo. Se recogieron un total de 36 muestras en volumen de un litro y se procedió a realizar la medición in situ de los parámetros en estudio, mediante el multiparametro SMART SENSOR DIGITAL. Los resultados en promedio de análisis arrojaron los siguientes resultados.

Tabla 6

Condiciones iniciales de los parámetros de estudio del DAM

<i>Parámetro</i>	<i>J (Amp/m²)</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>T (°C)</i>	<i>Estimación inicial promedio</i>
pH	0	0	12.6	4.22
ORP	0	0	12.9	53
CE	0	0	12.3	3452
STD	0	0	12.7	1380

La tabla 6 muestra los valores medios de los parámetros en condiciones iniciales de las cuatro variables respuestas, las cuales fueron consideradas como fuente de matriz de comparación a los resultados posteriores (post test) al tratamiento de electrocoagulación con electrodos móviles.

Resultados del post test

Representa los resultados de análisis del parámetro pH, ORP, CE y STD de acuerdo a los efectos de los factores, tiempo (minutos), densidad de

corriente eléctrica (Amp/m²) y velocidad angular (rad/s) operados a escala de laboratorio.

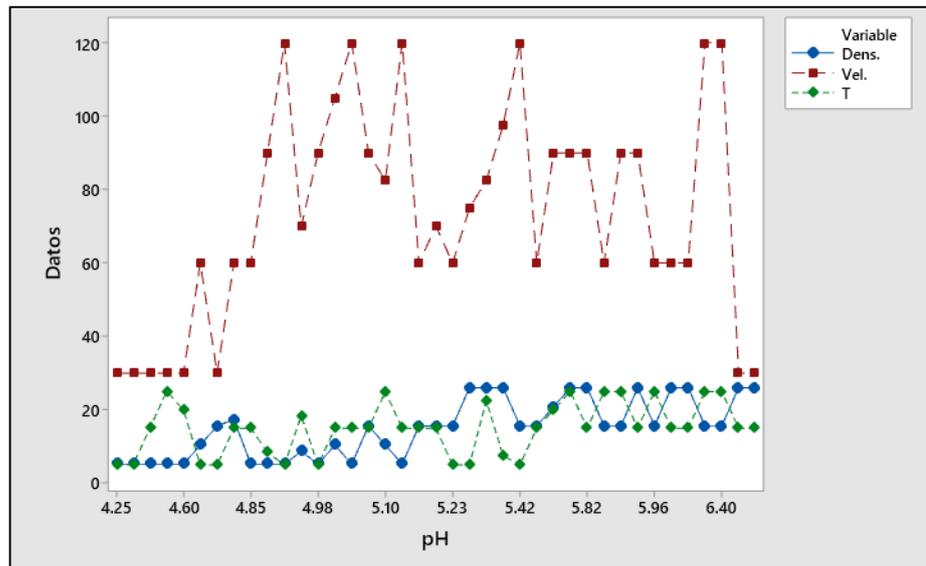
▪ **Estadísticas del pH**

Tabla 7
Descriptivos del parámetro pH

Variable	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
pH	5.2157	0.4961	0.2462	4.2500	4.9000	5.1350	5.4000	6.6000

De la tabla 7 podemos deducir que la media (5.2157) y desviación estándar (0.4961) del parámetro pH después del tratamiento infiere que no es suficiente para afirmar la eficiencia del equipo, por ello se recurrirá a los gráficos de interacción y posteriormente a las pruebas de hipótesis.

Gráfico 2
Comportamiento lineal del pH respecto su media



El gráfico 2 muestra el comportamiento de los tres factores influyentes, que, al variar la velocidad angular de 120 rpm a 30 rpm, la densidad de 5.21 A/m² a 26.04 A/m² y un tiempo de retención de 15 minutos, el pH comienza a incrementar en el rango de 4.25 a 6.40, buscando estabilizarse dentro de los LMP.

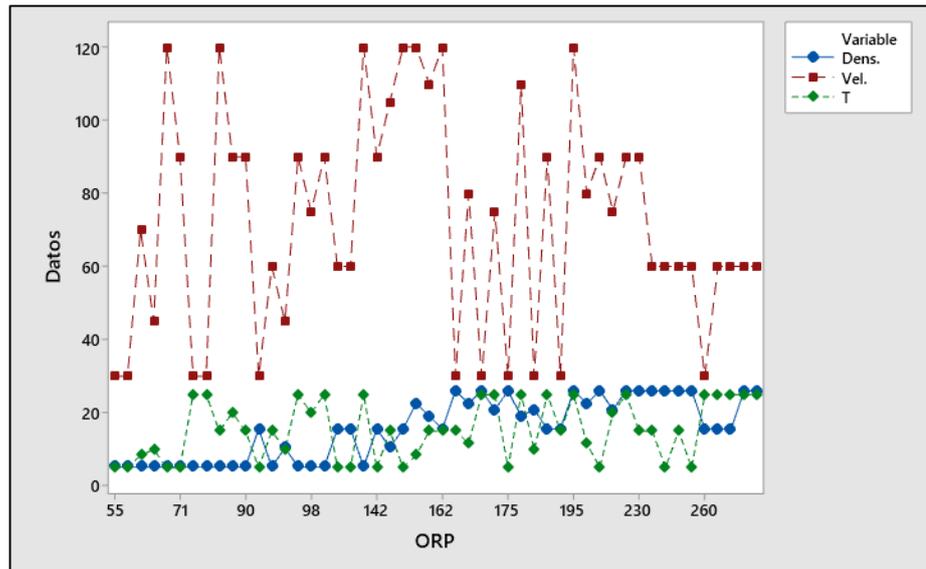
▪ **Estadísticas del ORP**

Tabla 8
Descriptivos de parámetro ORP

Variable	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
ORP	157.29	70.87	5022.86	55.00	92.50	160.00	213.75	336.00

De la tabla 8 podemos deducir que la media (157.29) y desviación estándar (70.87) del parámetro ORP después del tratamiento infiere que no es suficiente para afirmar la eficiencia del equipo, por ello se recurrirá a los gráficos de interacción y posteriormente a las pruebas de hipótesis.

Gráfico 3
Comportamiento lineal del ORP respecto su media



El gráfico 3 muestra el comportamiento de los tres factores influyentes, que al variar la velocidad angular de 120 rpm a 60 rpm , la densidad de 5.21 A/m² a 26.04 A/m² y un tiempo de retención de 25 minutos, el ORP comienza a incrementar en el rango de 55 mV a 260 mV, buscando estabilizarse dentro de los LMP.

▪ **Estadísticas del CE**

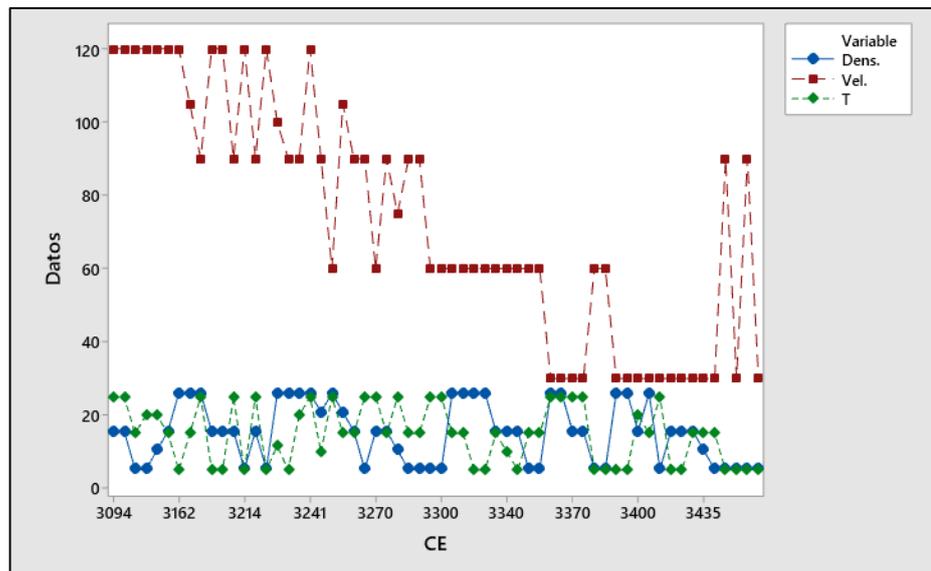
Tabla 9
Descriptivos del parámetro CE

Variable	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
CE	3288.5	101.1	10217.4	3094.0	3221.3	3279.5	3378.0	3450.0

De la tabla 9 podemos deducir que la media (3288.5) y desviación estándar (101.1) del parámetro CE después del tratamiento infiere que no es suficiente para afirmar la eficiencia del equipo, por ello se recurrirá a los gráficos de interacción y posteriormente a las pruebas de hipótesis.

Gráfico 4

Comportamiento lineal del CE respecto su media



El gráfico 4 muestra el comportamiento de los tres factores influyentes, que al variar la velocidad angular de 120 rpm a 30 rpm, la densidad de 15.63 A/m² a 5.21 A/m² y un tiempo de retención de 05 minutos, la CE comienza a decrecer (de acuerdo al pre test) en el rango de 3435 μS/cm a 3094 μS/cm, buscando estabilizarse dentro de los LMP.

- *Estadísticas del STD*

Tabla 10

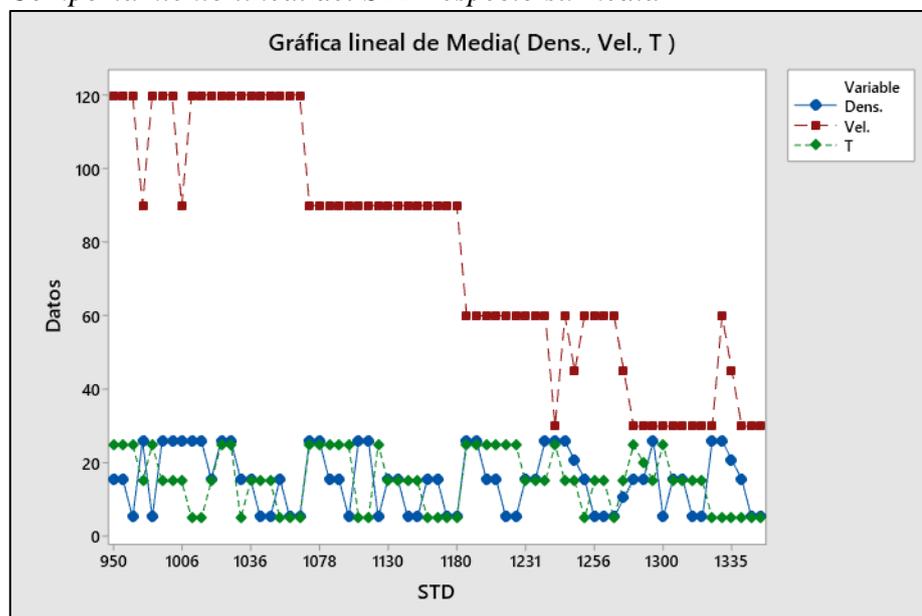
Descriptivos del parámetro STD

Variable	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
STD	1169.3	120.6	14542.4	950.0	1048.5	1185.0	1275.0	1360.0

De la tabla 10 podemos deducir que la media (1169.3) y desviación estándar (120.6) del parámetro STD después del tratamiento infiere que no es suficiente para afirmar la eficiencia del equipo, por ello se recurrirá a los gráficos de interacción y posteriormente a las pruebas de hipótesis.

Gráfico 5

Comportamiento lineal del STD respecto su media



El gráfico 5 muestra el comportamiento de los tres factores influyentes, que al variar la velocidad angular de 120 rpm a 30 rpm , la densidad de 15.63 A/m² a 5.21 A/m² y un tiempo de retención de 05 minutos, los STD comienza a decrecer (de acuerdo al pre test) en el rango de 1335 mg/L a 950 mg/L, buscando estabilizarse dentro de los LMP.

4.2. Discusión de resultados

Existe muchas técnicas y alternativas para la prevención, control y tratamiento de los DAM, pero en su gran mayoría se discute las muchas deficiencias al momento de gestionar los riesgos ambientales producentes en las diferentes etapas de jerarquía de control de la fuente (raíz del peligro) como la eliminación, sustitución y controles de ingeniería. No obstante, las tecnologías emergentes cada día más van adquiriendo una gran importancia debido a su versatilidad, minimización de tamaño y una gran capacidad de automatización, como es el caso de los procesos electroquímicos (electrocoagulación), que, a diferencia de la coagulación química (reactivos), la adición electrolítica de iones metálicos (Aluminio) compone una gran ventaja respecto a la adición de químicos.

Respecto al planteamiento del objetivo general; “Diseñar un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en el tratamiento de las aguas acidas

mineras Huancavelica 2021”, la estimación de resultados conlleva a comparar los procesos de electrocoagulación con los diseños convencionales (electrodos fijos) y el diseño emergente (electrodos móviles). Estos modelos mantienen los principios de configuración monopolar y bipolar que, de acuerdo a Bermúdez y Salazar, Piedra y Zambrano (2019) en sus diseños mantuvieron la conexión en serie con electrodos (placas) de aluminio y fierro logrando porcentajes promedio de reducción de metales pesados entre 90.6 y 96.75 % respectivamente. De acuerdo al sustento convencional el diseño con electrodos móviles toma una mayor ventaja en cuanto al manejo y control de la cantidad de factores (densidad de corriente, tiempo, velocidad angular y temperatura) logrando una eficiencia de 81.60 %, 42.58 %, 94.93 % y 80.70 % de tratamiento en promedio, evitando el estancamiento y retardamiento en el proceso de coagulación y/o floculación electrolítica y una posterior sedimentación, que al igual que Milla (2019) mediante su diseño con una sola placa de aluminio de geometría longitudinal en zigzag con tecnología móvil logro 80.97 % en el tratamiento.

De acuerdo al análisis de los parámetros que representa los cuatro objetivos específicos; “Estimar la eficiencia del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en el control del pH, ORP, CE y STD en el tratamiento de aguas acidas mineras Huancavelica 2021” se logró controlar los factores de efectos de interacción siendo el pH en un 18.40%, en el intervalo de 4.22 a 6.60 unidades de pH, ORP en 57.42 %, en el intervalo de 53 a 305 mV, mostrando aumentos significativos en la tratabilidad y una disminución en la CE en 5.07 %, en el intervalo de 3452 a 3110 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y STD en 19.30 %, en el intervalo de 1380 a 950 mg/L de acuerdo a los "Límites Máximos Permisibles" de efluentes mineros - metalúrgicas. Estos resultados concuerdan con Prieto et al. (2014), que al incrementar iones de OH^- aumenta el pH y ORP mediante la disolución del aluminio (electrodo) que concuerda con Linares, et ál. (2011) que al neutralizar el pH en el rango de 7.2 a 8, la oxidación electroquímica permite un mejor tratamiento en la disolución de metales pesados y la neutralización del agua ácida. Nuevamente. Concerniente a la conjugación de tratamiento de los parámetros de CE y STD, Milla (2019), Mayta y Mayta (2017) mostraron un incremento en el pH y una disminución significativa en el control de la CE y STD con lo que

concluye Castañeda y Choton (2018) que al desestabilizar coloide metálicos pesados por medio de electrodos anódicos e incrementar la intensidad de corriente eléctrica disminuyen los parámetros conjugados.

El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles compuesto por dos electrodos (ánodo y cátodo) que componen la celda electrolítica, basado en dos placas (4cm de alejamiento) de aluminio con giros establecidos (revoluciones/minuto), que para lograr la formación del coagulante eléctrico, hace referencia a la dependencia de las dimensiones de las placas (8x12x0.2cm) como base fundamental para lograr una intensidad de corriente eléctrica y voltaje adecuado para poder disipar densidades de corriente eléctrica controladas (5.21, 15.63 y 26.04 Amp/m²) en tiempos (5, 15 y 25 minutos) y velocidad de giro (30, 60, 90 y 120 rpm) a temperatura de ambiente logro valores significativos de reducción y aumento que a comparación del método convencional no consideraron las dimensiones respectivas de electrodos en función de los factores de efectos (DCE) por lo que hace referencia Calderón y Aramburu (2017). De los estimado Malca, Gonzales, Farfán, y Licapa (2019) sostienen en promedio los efectos del tiempo de retención y la densidad de corriente eléctrica que fluctúan entre 5 a 40 y de 5 a 30 Amp/m² respectivamente. Y de acuerdo a la velocidad angular sostiene Milla (2019) que en promedio los giros más representativos significativos de tratamiento de aguas acidas fluctúan de 40 a 140 rpm, todo ello dispuesto por las limitaciones teóricas respecto a este método emergente llamada tecnología verde o ecológica.

4.3. Proceso de prueba de hipótesis

4.3.1. Contrastación de hipótesis general

a. Redacción de las hipótesis de investigación y contraste

- **Hipótesis alterna y nula de la investigación**

Ha: El diseño de un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el tratamiento de las aguas acidas mineras.

Ho: El diseño de un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara ineficazmente el tratamiento de las aguas acidas mineras.

- **Formulación de la hipótesis de contraste**

Ho: “No existe diferencia significativa entre los parámetros de aguas acidas mineras (pH, ORP, CE y STD) antes y después de su tratamiento por el sistema de electrocoagulación con electrodos móviles”.

$$H_0: \beta_1 = 0$$

Ha: “Si existe diferencia significativa entre los parámetros de aguas acidas mineras (pH, ORP, CE y STD) antes y después de su tratamiento por el sistema de electrocoagulación con electrodos móviles”.

$$H_a: \beta_1 \neq 0$$

b. Nivel de significancia

Se estableció con un error del 5% y un 95% de confiabilidad, es decir:

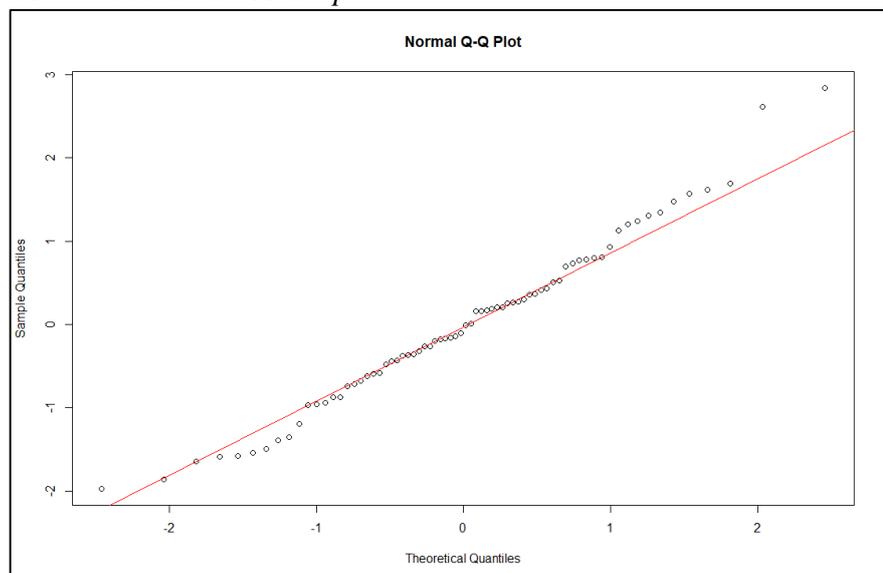
$$\alpha = 0.05$$

c. Corroboración de supuestos

- **Test de normalidad y homogeneidad de varianzas del pH**

Gráfico 6

Normalidad de datos del pH



Shapiro-Wilk normality test

Data: rstandard (Model)

W = 0.98366, p-value = 0.4749

- Ho: Los residuos conllevan a una distribución normales.
- Ha: Los residuos no conllevan a una distribución normales.

Test of homogeneity of variances (Bartlett)

Méthod	Statistics test	Value p
Bartlett	42.50	0.102

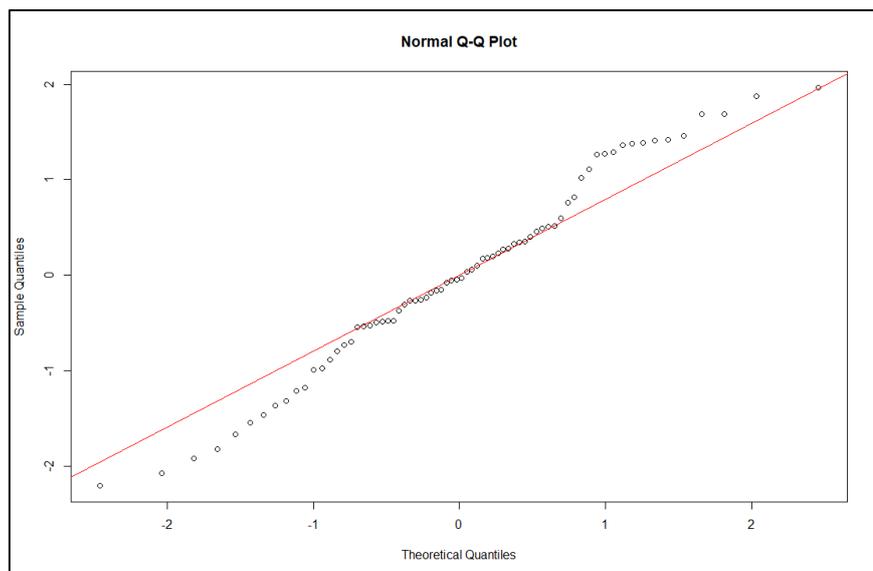
- Ho: Todas las varianzas son iguales.
- Ha: No todas las varianzas son iguales.

El gráfico 6 determina que los datos (72 corridas del pH) provienen de una distribución normal, a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y bajo los supuestos de Shapiro - Wilk con valor de probabilidad de $0.4749 > 0.05$ y con una homogeneidad de varianzas de $0.102 > 0.05$ determinada por la prueba de Bartlett. Se concluye que se acepta la hipótesis estadística nula.

Test de normalidad y homogeneidad de varianzas del ORP

Gráfico 7

Normalidad de datos del ORP



Shapiro-Wilk normality test

Data: rstandard (Model)

W = 0.98087, p-value = 0.3423

- Ho: Los residuos conllevan a una distribución normales.
- Ha: Los residuos no conllevan a una distribución normales.

Test of homogeneity of variances (Bartlett)

Méthod	Statistics test	Value p
Bartlett	24.31	0.864

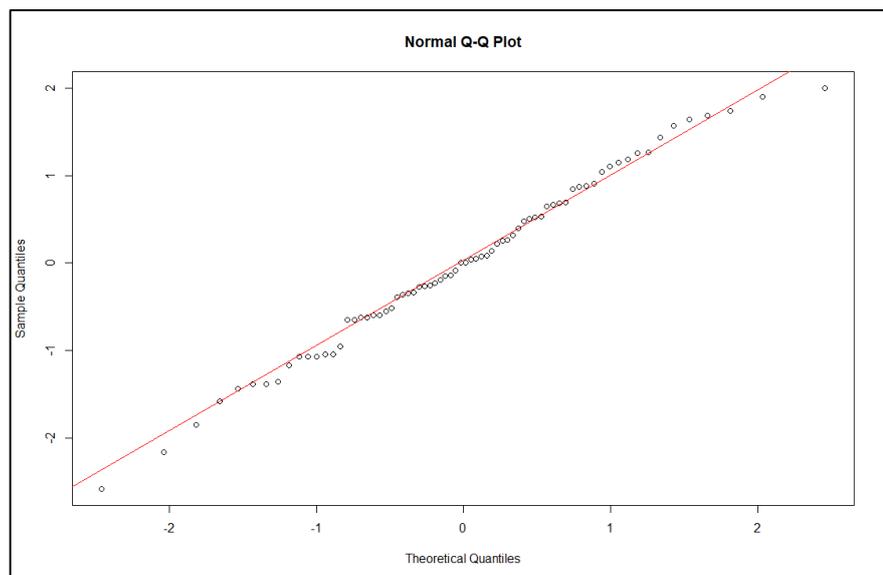
- Ho: Todas las varianzas son iguales.
- Ha: No todas las varianzas son iguales.

El gráfico 7 determina que los datos (72 corridas del ORP) provienen de una distribución normal, a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y bajo los supuestos de Shapiro - Wilk con valor de probabilidad de $0.3423 > 0.05$ y con una homogeneidad de varianzas de $0.864 > 0.05$ determinada por la prueba de Bartlett. Se concluye que se acepta la hipótesis estadística nula.

Test de normalidad y homogeneidad de varianzas de la (CE)

Gráfico 8

Normalidad de datos de la CE



Shapiro-Wilk normality test

Data: rstandard (Model)

W = 0.9905, p-value = 0.8682

- Ho: Los residuos conllevan a una distribución normales.
- Ha: Los residuos no conllevan a una distribución normales.

Test of homogeneity of variances (Bartlett)

Méthod	Statistics test	Value p
Bartlett	22.29	0.953

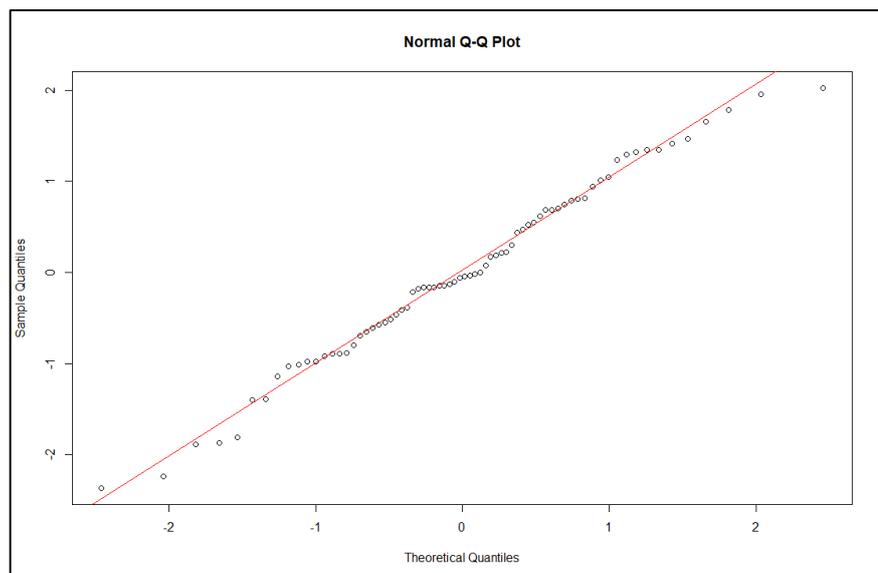
- Ho: Todas las varianzas son iguales.
- Ha: No todas las varianzas son iguales.

El gráfico 8 determina que los datos (72 corridas de la conductividad electrica CE) provienen de una distribución normal, a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y bajo los supuestos de Shapiro - Wilk con valor de probabilidad de $0.8682 > 0.05$ y con una homogeneidad de varianzas de $0.953 > 0.05$ determinada por la prueba de Bartlett. Se concluye que se acepta la hipótesis estadística nula.

Test de normalidad y homogeneidad de varianzas de los STD

Gráfico 9

Normalidad de datos de los STD



Shapiro-Wilk normality test

Data: rstandard (Model)

W = 0.98715, p-value = 0.6776

- Ho: Los residuos conllevan a una distribución normales.
- Ha: Los residuos no conllevan a una distribución normales.

Test of homogeneity of variances (Bartlett)

Méthod	Statistics test	Value p
Bartlett	22.66	0.931

- Ho: Todas las varianzas son iguales.
- Ha: No todas las varianzas son iguales.

El gráfico 9 determina que los datos (72 corridas del STD) provienen de una distribución normal, a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y bajo los supuestos de Shapiro - Wilk con valor de probabilidad de $0.6776 > 0.05$ y con una homogeneidad de varianzas de $0.931 > 0.05$ determinada por la prueba de Bartlett. Se concluye que se acepta la hipótesis estadística nula.

d. Test estadístico

El estadístico aplicado fue un ANVA con un diseño experimental complementa al azar (DCA) considerando un arreglo factorial de la forma $3 \times 3 \times 4 \times 2$ de los 4 parámetros en estudio (pH, ORP, CE y STD) con pre test y un post test.

Tabla 11
ANVA de 3 factores del pH, ORP, CE y STD

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Velocidad:FactorC_Tiempo	12	1.2354	0.1030	2.824	0.007931 **
Residuals	36	1.3124	0.0365		
FactorA_Densidad:FactorB_Velocidad:FactorC_Tiempo	12	27105	2259	88.10	<2e-16 ***
Residuals	36	923	26		
FactorA_Densidad:FactorB_Velocidad:FactorC_Tiempo	12	30783	2565	5.275	4.84e-05 ***
Residuals	36	17506	486		
FactorA_Densidad:FactorB_Velocidad:FactorC_Tiempo	12	58209	4851	28.56	8.42e-15 ***
Residuals	36	6114	170		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

La tabla 11 expresa la comparación de medias de cuadrados (ANVA) de los 72 tratamientos y dos réplicas, referente a los cuatro

parámetros (pH, ORP, CE y STD), donde se aprecia la interacción de tres factores (densidad, velocidad y tiempo) a valores de 0.007931 , $2e^{-16}$, $4.84e^{-05}$ y $8.42e^{-15}$ respectivamente. Los efectos de interacción de los Factor A, B y C conjugados a tiempos en intervalos de 5 a 25 minutos, densidad de corriente eléctrica de 5.21 a 26.04 A/m² y velocidad angular de 30 a 120 rad/s afectan a las variables respuestas con una interacción significativa alta.

e. Decisión estadística

- Si: p-Value $< \alpha = 0.05$, se rechaza la Ho
- Si: p-Value $> \alpha = 0.05$, se rechaza la Ho

Acorde a los resultados de ANVA y a un nivel de significancia de 5%, con 12 grados de libertad (gl) de interacción de factores y 36 gl de residuo para los parámetros (pH, ORP, CE y STD) con valores respectivos de 0.007931 , $2e^{-16}$, $4.84e^{-05}$ y $8.42e^{-15} < 0.05$. Se rechaza la hipótesis nula (Ho) y aceptamos la hipótesis alterna (Ha), es decir qué; “El diseño de un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el tratamiento de las aguas acidas mineras”.

4.3.2. Contrastación de las hipótesis específicas

Hipótesis específica 01: pH

a. Redacción de las hipótesis de investigación y contraste

- **Hipótesis alterna y nula de la investigación**

Ho: El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el control del pH en el tratamiento de aguas acidas mineras.

Ha: El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara ineficazmente el control del pH en el tratamiento de aguas acidas mineras.

- **Formulación de la hipótesis de contraste**

Ho: “No existe diferencia significativa entre los parámetros de aguas acidas mineras del pH antes y después de su tratamiento por el sistema de electrocoagulación con electrodos móviles”. $H_o: \beta_1 = 0$

Ha: “Si existe diferencia significativa entre los parámetros de aguas acidas mineras del pH antes y después de su tratamiento por el sistema de electrocoagulación con electrodos móviles”. $H_a: \beta_1 \neq 0$

b. Nivel de significancia

Se estableció con un error del 5% y un 95% de confiabilidad, es decir:

$$\alpha = 0.05$$

c. Test estadístico

El estadístico aplicado fue un ANVA con un diseño experimental complementa al azar (DCA) considerando un arreglo factorial de la forma 3 x 3 x 4 x 2 con pre test y un post test.

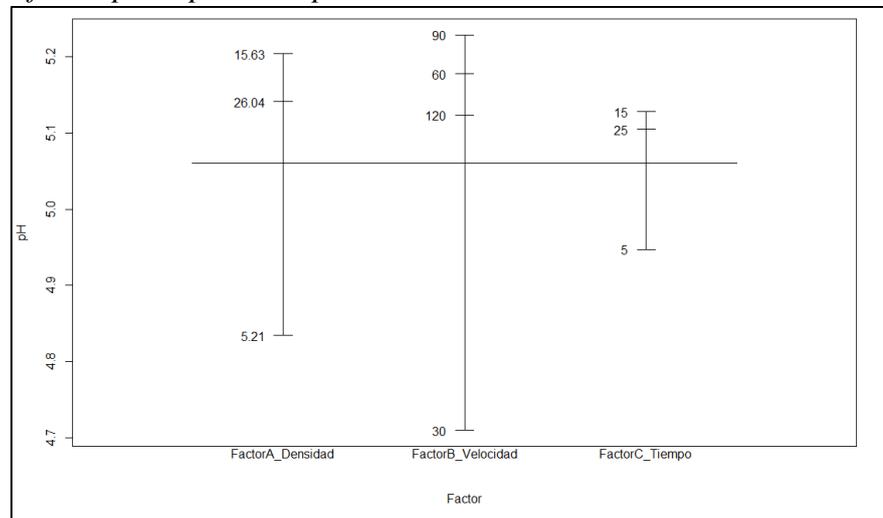
Tabla 12
ANVA de 3 factores del pH

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	1.8768	0.9384	25.740	1.15e-07	***
FactorB_Velocidad	3	3.0403	1.0134	27.799	1.75e-09	***
FactorC_Tiempo	2	0.4622	0.2311	6.339	0.004381	**
FactorA_Densidad:FactorB_Velocidad	6	1.7217	0.2869	7.871	1.86e-05	***
FactorA_Densidad:FactorC_Tiempo	4	0.5289	0.1322	3.627	0.013910	*
FactorB_Velocidad:FactorC_Tiempo	6	1.1116	0.1853	5.082	0.000723	***
FactorA_Densidad:FactorB_Velocidad:FactorC_Tiempo	12	1.2354	0.1030	2.824	0.007931	**
Residuals	36	1.3124	0.0365			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

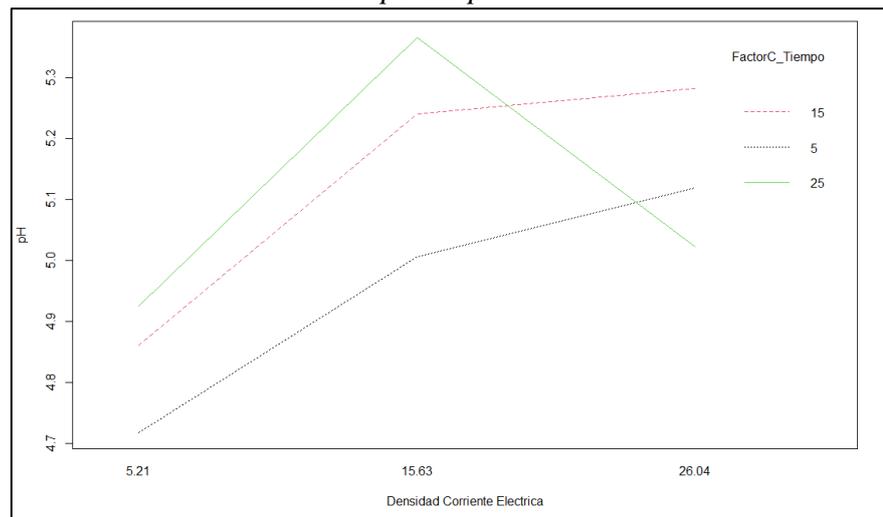
La tabla 12 detalla el ANVA de los 72 tratamientos con dos corridas, referente a pH, donde se aprecia la interacción de los factores de manera individual ($D = 1.152e^{-07}$, $V = 1.75 e^{-09}$, $T = 0.004381$), factores conjugado de dos en dos ($D:V = 1.86e^{-05}$, $D:T = 0.013910$, $V:T = 0.000723$) y tres factores conjugados ($D:V:T = 0.007931$). Los valores independientes y conjugados representan la influencia de factores sobre la variable respuesta, mostrando una significancia muy alta en intervalos de tiempos de 5 a 25 minutos, densidad de corriente eléctrica de 5.21 a 26.04 A/m² y velocidad angular de 30 a 120 rpm, que afectan al parámetro ORP.

Gráfico 10
Efectos principales del pH



El gráfico 10 muestra los efectos principales del pH, donde se aprecia que a una densidad de 15.63 A/m² y velocidad angular de 90 rpm, el pH muestra un incremento mayor a 5.2, y con un tiempo de 15 minutos se sitúa de 5.1 a 5.2 unidades de H⁺. La línea de referencia representa la media de los factores, que indica el incremento del pH en el intervalo de 5.0a 5.1 unidades de pH.

Gráfico 11
Interacción densidad vs tiempo del pH

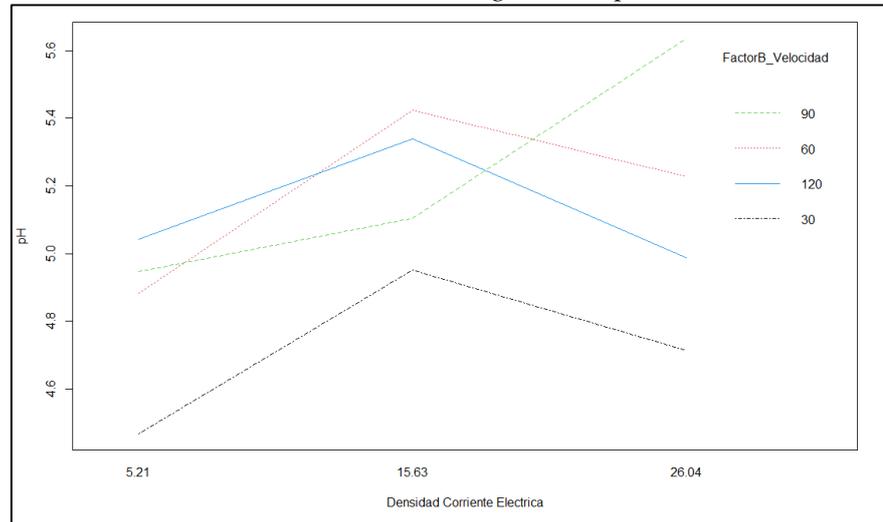


El gráfico 11 muestra los efectos de interacción de los factores conjugados densidad y tiempo, respecto al parámetro pH que, de acuerdo a la línea de color rojo, muestra un incremento óptimo de

interacción, logrando valores de H^+ en el intervalo de 5.2 y 5.3 unidades de pH con 26.04 A/m² y 15 minutos respectivamente.

Gráfico 12

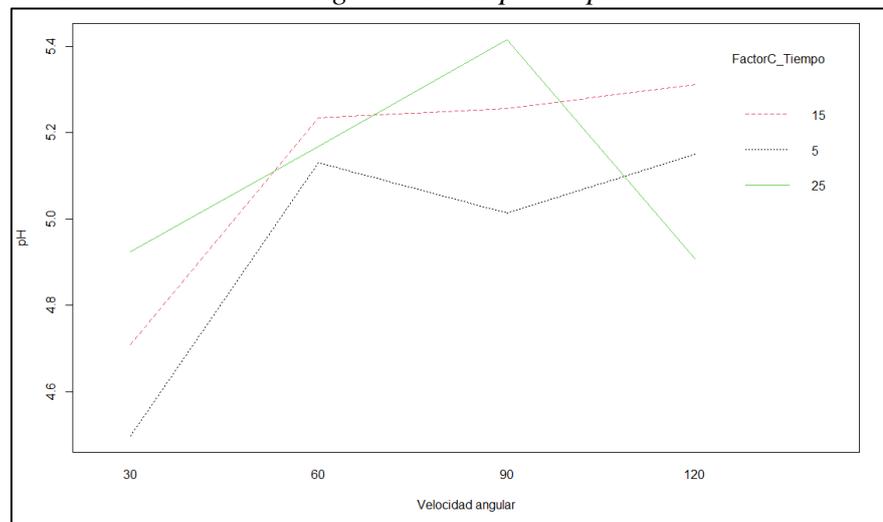
Interacción densidad vs velocidad angular del pH



El gráfico 12 muestra los efectos de interacción de los factores conjugados densidad y velocidad angular, respecto al parámetro pH, que de acuerdo a las líneas de color verde se observa un incremento óptimo de interacción entre los factores densidad y velocidad angular, logrando valores de H^+ superior a 5.6 unidades de pH con 26.04 A/m² y 90 rpm respectivamente.

Gráfico 13

Interacción velocidad angular vs tiempo del pH



El gráfico 13 muestra los efectos de interacción de los factores conjugados densidad y velocidad angular, respecto al parámetro pH, que de acuerdo a las líneas de color verde se observa un incremento óptimo de interacción entre los factores densidad y velocidad angular, logrando valores de H⁺ en el intervalo de 5.2 y 5.4 unidades de pH con 120 rpm y 15 minutos respectivamente.

Ecuación de regresión lineal: pH vs densidad, velocidad y tiempo:

$$\begin{aligned}
 \text{pH} = & 5.0922 - 0.2576 D_{5.21} + 0.1119 D_{15.63} + 0.1457 D_{26.04} - 0.3822 V_{30} \\
 & + 0.0856 V_{60} + 0.1367 V_{90} + 0.1600 V_{120} - 0.1447 T_5 + 0.0357 T_{15} + \\
 & 0.1090 T_{25} + 0.0143 D*V_{5.21\ 30} - 0.0368 D*V_{5.21\ 60} - 0.0246 D*V_{5.21\ 90} \\
 & + 0.0471 D*V_{5.21\ 120} + 0.1281 D*V_{15.63\ 30} + 0.1336 D*V_{15.63\ 60} - 0.2375 \\
 & D*V_{15.63\ 90} - 0.0242 D*V_{15.63\ 120} - 0.1424 D*V_{26.04\ 30} - 0.0968 \\
 & D*V_{26.04\ 60} + 0.2621 D*V_{26.04\ 90} - 0.0229 D*V_{26.04\ 120} + 0.0276 \\
 & D*T_{5.21\ 5} - 0.0090 D*T_{5.21\ 15} - 0.0186 D*T_{5.21\ 25} - 0.0532 D*T_{15.63\ 5} + \\
 & 0.0001 D*T_{15.63\ 15} + 0.0531 D*T_{15.63\ 25} + 0.0256 D*T_{26.04\ 5} + 0.0089 \\
 & D*T_{26.04\ 15} - 0.0344 D*T_{26.04\ 25} - 0.0686 V*T_{30\ 5} - 0.0374 V*T_{30\ 15} + \\
 & 0.1060 V*T_{30\ 25} + 0.0969 V*T_{60\ 5} + 0.0215 V*T_{60\ 15} - 0.1185 V*T_{60\ 25} \\
 & - 0.0708 V*T_{90\ 5} - 0.0079 V*T_{90\ 15} + 0.0788 V*T_{90\ 25} + 0.0425 V*T_{120\ 5} \\
 & + 0.0238 V*T_{120\ 15} - 0.0663 V*T_{120\ 25} - 0.0160 D*V*T_{5.21\ 30\ 5} + 0.1040 \\
 & D*V*T_{5.21\ 30\ 15} - 0.0881 D*V*T_{5.21\ 30\ 25} - 0.0132 D*V*T_{5.21\ 60\ 5} - \\
 & 0.0815 D*V*T_{5.21\ 60\ 15} + 0.0947 D*V*T_{5.21\ 60\ 25} + 0.0813 D*V*T_{5.21\ 90\ 5} \\
 & - 0.0154 D*V*T_{5.21\ 90\ 15} - 0.0658 D*V*T_{5.21\ 90\ 25} - 0.0521 D*V*T_{5.21\ 120\ 5} \\
 & - 0.0071 D*V*T_{5.21\ 120\ 15} + 0.0592 D*V*T_{5.21\ 120\ 25} + 0.0415 \\
 & D*V*T_{15.63\ 30\ 5} + 0.0265 D*V*T_{15.63\ 30\ 15} - 0.0681 D*V*T_{15.63\ 30\ 25} - \\
 & 0.1074 D*V*T_{15.63\ 60\ 5} + 0.0693 D*V*T_{15.63\ 60\ 15} + 0.0381 D*V*T_{15.63\ 60\ 25} \\
 & + 0.0404 D*V*T_{15.63\ 90\ 5} - 0.1963 D*V*T_{15.63\ 90\ 15} + 0.1558 \\
 & D*V*T_{15.63\ 90\ 25} + 0.0254 D*V*T_{15.63\ 120\ 5} + 0.1004 D*V*T_{15.63\ 120\ 15} \\
 & - 0.1258 D*V*T_{15.63\ 120\ 25} - 0.0256 D*V*T_{26.04\ 30\ 5} - 0.1306 \\
 & D*V*T_{26.04\ 30\ 15} + 0.1561 D*V*T_{26.04\ 30\ 25} + 0.1206 D*V*T_{26.04\ 60\ 5} \\
 & + 0.0122 D*V*T_{26.04\ 60\ 15} - 0.1328 D*V*T_{26.04\ 60\ 25} - 0.1217 \\
 & D*V*T_{26.04\ 90\ 5} + 0.2117 D*V*T_{26.04\ 90\ 15} - 0.0900 D*V*T_{26.04\ 90\ 25} + \\
 & 0.0267 D*V*T_{26.04\ 120\ 5} - 0.0933 D*V*T_{26.04\ 120\ 15} + 0.0667 \\
 & D*V*T_{26.04\ 120\ 25}
 \end{aligned}$$

Donde:

- Intercepto = 5.0922
- D = densidad, V= velocidad y T = tiempo.
- D*V, D*T y V*T = interacción de dos factores.
- D*V*T = interacción de tres factores.

d. Decisión estadística

- Si: p-Value < $\alpha = 0.05$, se rechaza la Ho1
- Si: p-Value > $\alpha = 0.05$, se rechaza la Ho1

Acorde a la Tabla de ANVA y a un nivel de significancia de 5%, donde se aprecia la interacción de los factores de manera individual ($D = 1.152e^{-07}$, $V = 1.75 e^{-09}$, $T = 0.004381$), factores conjugado de dos en dos ($D:V = 1.86e^{-05}$, $D:T = 0.013910$, $V:T = 0.000723$) y tres factores conjugados ($D:V:T = 0.007931$) < $\alpha = 0.05$. Se rechaza la hipótesis nula (Ho) y aceptamos la hipótesis alterna (Ha), es decir qué; “El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el control del pH en el tratamiento de aguas acidas mineras.”

Hipótesis específica 02: ORP

a. Redacción de las hipótesis de investigación y contraste

- **Formulación de la hipótesis alterna y nula**

Ho: El diseño de un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el tratamiento de las aguas acidas mineras.

Ha: El diseño de un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara ineficazmente el tratamiento de las aguas acidas mineras.

- **Formulación de la hipótesis de contraste**

Ho: “No existe diferencia significativa entre los parámetros de aguas acidas mineras del ORP antes y después de su tratamiento por el sistema de electrocoagulación con electrodos móviles”. $H_0: \beta_1 = 0$

Ha: “Si existe diferencia significativa entre los parámetros de aguas acidas mineras del ORP antes y después de su tratamiento por el sistema de electrocoagulación con electrodos móviles”. $H_a: \beta_1 \neq 0$

b. Nivel de significancia

Se estableció con un error del 5% y un 95% de confiabilidad, es decir:

$$\alpha = 0.05$$

c. Test estadístico

El estadístico aplicado fue un ANVA con un diseño experimental complementa al azar (DCA) considerando un arreglo factorial de la forma 3 x 3 x 4 x 2 con pre test y un post test.

d. Corroboración de supuestos

Tabla 13

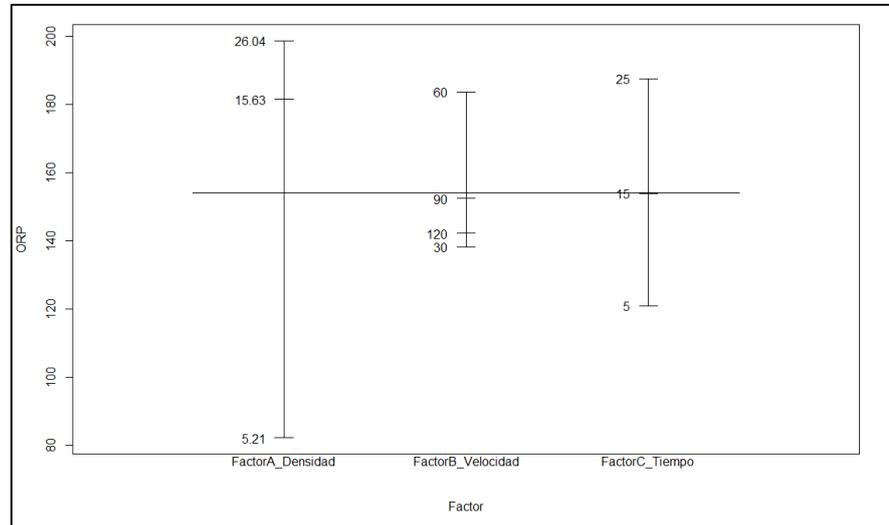
ANVA de 3 factores del ORP

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	189530	94765	3696.14	<2e-16	***
FactorB_Velocidad	3	22834	7611	296.86	<2e-16	***
FactorC_Tiempo	2	53135	26568	1036.22	<2e-16	***
FactorA_Densidad:FactorB_Velocidad	6	19156	3193	124.53	<2e-16	***
FactorA_Densidad:FactorC_Tiempo	4	9063	2266	88.37	<2e-16	***
FactorB_Velocidad:FactorC_Tiempo	6	13907	2318	90.41	<2e-16	***
FactorA_Densidad:FactorB_Velocidad:FactorC_Tiempo	12	27105	2259	88.10	<2e-16	***
Residuals	36	923	26			

Signif. codes:	0	****	0.001	***	0.01	**
				0.05	.	*
				0.1	'	
				1		

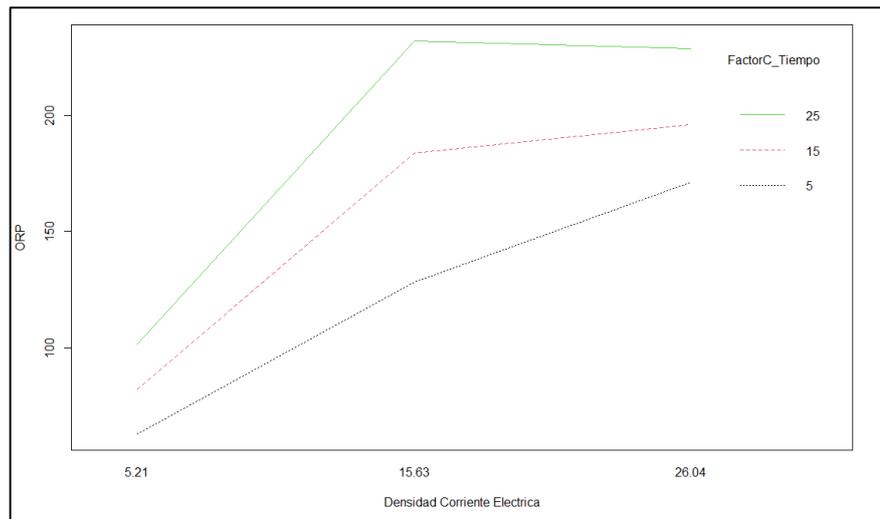
La tabla 13 detalla el ANVA de los 72 tratamientos con dos corridas, referente a ORP, donde se aprecia la interacción de los factores de manera individual ($D = 2e^{-16}$, $V = 2e^{-16}$, $T = 2e^{-16}$), factores conjugado de dos en dos ($D:V = 2e^{-16}$, $D:T = 2e^{-16}$, $V:T = 2e^{-16}$) y tres factores conjugados ($D:V:T = 2e^{-16}$). Los valores independientes y conjugados representan la influencia de factores sobre la variable respuesta, mostrando una significancia muy alta en intervalos de tiempos de 5 a 25 minutos, densidad de corriente eléctrica de 5.21 a 26.04 A/m² y velocidad angular de 30 a 120 rpm, que afectan al parámetro ORP.

Gráfico 14
Efectos principales del ORP



El gráfico 14 muestra los efectos principales del ORP, donde se aprecia que a una densidad de 26.04 A/m², velocidad angular de 60 rpm y tiempo de 25 minutos, el ORP muestra un incremento cercano a 200 mV. La línea de referencia representa la media de los factores, que indica el incremento del ORP en el intervalo de 140 a 160 mV.

Gráfico 15
Interacción de densidad y tiempo del ORP

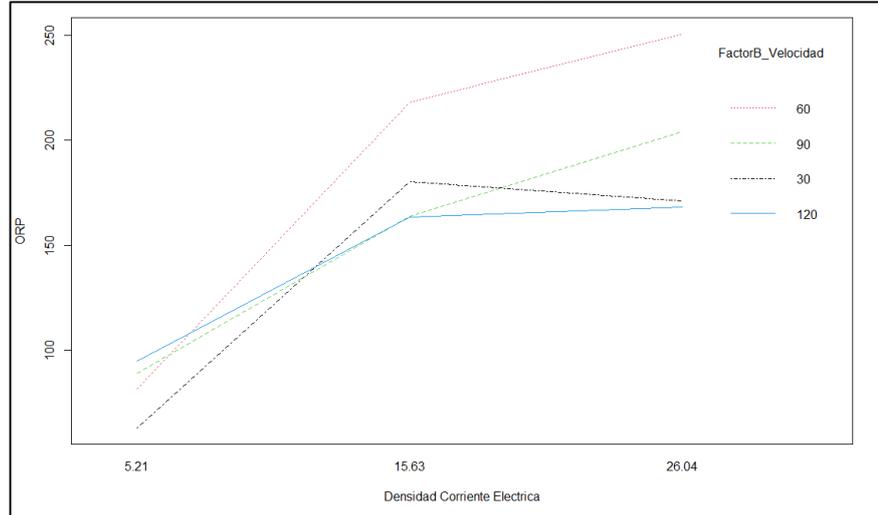


El gráfico 15 muestra los efectos de interacción de los factores conjugados densidad y tiempo, respecto al parámetro ORP, que, de acuerdo a la línea de color verde, muestra un incremento óptimo de

interacción, logrando valores de óxido reducción superior a 200 mV con 26.04 A/m² y 25 minutos respectivamente.

Gráfico 16

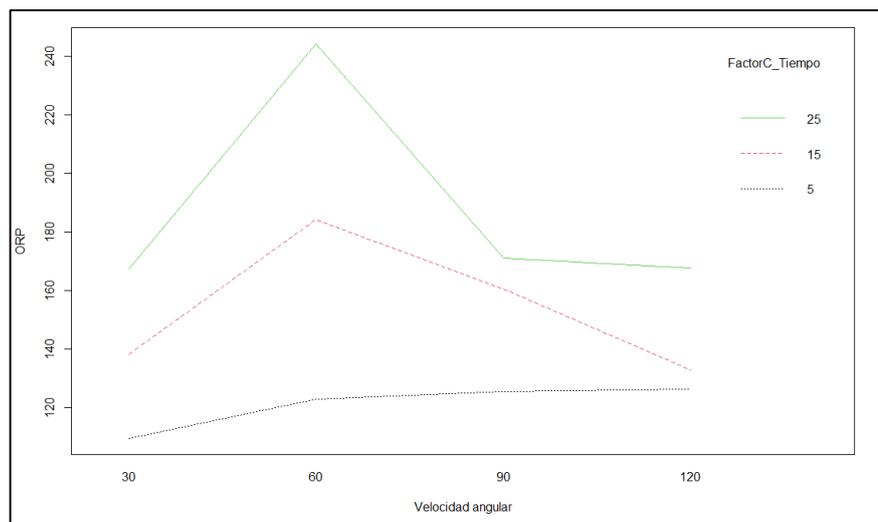
Interacción de la densidad y velocidad angular del ORP



El gráfico 16 muestra los efectos de interacción de los factores conjugados densidad y velocidad angular, respecto al parámetro ORP, que, de acuerdo a la línea de color rojo, muestra un incremento óptimo de interacción, logrando valores de óxido reducción cercano a 250 mV con 26.04 A/m² y 60 rpm respectivamente.

Gráfico 17

Interacción la velocidad angular y tiempo del ORP



El gráfico 17 muestra los efectos de interacción de los factores conjugados velocidad angular y tiempo, respecto al parámetro ORP, que, de acuerdo a la línea de color verde, muestra un incremento óptimo de interacción, logrando valores de óxido reducción superior a 240 mV con 60 rpm y tiempo de 25 minutos respectivamente.

Ecuación de regresión factorial: ORP vs densidad, velocidad y tiempo:

$$\begin{aligned}
 \text{ORP} = & 155.639 - 73.431 D_{5.21} + 25.778 D_{15.63} + 47.653 D_{26.04} - 17.42 V_{30} \\
 & + 34.19 V_{60} - 3.31 V_{90} - 13.47 V_{120} - 30.056 T_{5} - 1.764 T_{15} + 31.819 \\
 & T_{25} - 1.79 D*V_{5.21 30} - 34.57 D*V_{5.21 60} + 10.26 D*V_{5.21 90} + 26.10 \\
 & D*V_{5.21 120} + 16.50 D*V_{15.63 30} + 2.56 D*V_{15.63 60} - 14.44 D*V_{15.63} \\
 & 90 - 4.61 D*V_{15.63 120} - 14.71 D*V_{26.04 30} + 32.01 D*V_{26.04 60} + 4.18 \\
 & D*V_{26.04 90} - 21.49 D*V_{26.04 120} + 10.85 D*T_{5.21 5} + 1.56 D*T_{5.21 15} \\
 & - 12.40 D*T_{5.21 25} - 22.86 D*T_{15.63 5} + 4.10 D*T_{15.63 15} + 18.76 \\
 & D*T_{15.63 25} + 12.01 D*T_{26.04 5} - 5.65 D*T_{26.04 15} - 6.36 D*T_{26.04 25} + \\
 & 1.17 V*T_{30 5} + 1.71 V*T_{30 15} - 2.87 V*T_{30 25} - 18.44 V*T_{60 5} - 4.07 \\
 & V*T_{60 15} + 22.51 V*T_{60 25} + 3.22 V*T_{90 5} + 9.93 V*T_{90 15} - 13.15 \\
 & V*T_{90 25} + 14.06 V*T_{120 5} - 7.57 V*T_{120 15} - 6.49 V*T_{120 25} + 10.54 \\
 & D*V*T_{5.21 30 5} - 3.50 D*V*T_{5.21 30 15} - 7.04 D*V*T_{5.21 30 25} + 16.82 \\
 & D*V*T_{5.21 60 5} + 15.44 D*V*T_{5.21 60 15} - 32.26 D*V*T_{5.21 60 25} - 2.18 \\
 & D*V*T_{5.21 90 5} - 4.89 D*V*T_{5.21 90 15} + 7.07 D*V*T_{5.21 90 25} - 25.18 \\
 & D*V*T_{5.21 120 5} - 7.06 D*V*T_{5.21 120 15} + 32.24 D*V*T_{5.21 120 25} - \\
 & 36.25 D*V*T_{15.63 30 5} + 4.46 D*V*T_{15.63 30 15} + 31.79 D*V*T_{15.63 30} \\
 & 25 - 22.81 D*V*T_{15.63 60 5} + 6.07 D*V*T_{15.63 60 15} + 16.74 D*V*T_{15.63} \\
 & 60 25 + 29.53 D*V*T_{15.63 90 5} - 13.43 D*V*T_{15.63 90 15} - 16.10 \\
 & D*V*T_{15.63 90 25} + 29.53 D*V*T_{15.63 120 5} + 2.90 D*V*T_{15.63 120 15} - \\
 & 32.43 D*V*T_{15.63 120 25} + 25.71 D*V*T_{26.04 30 5} - 0.96 D*V*T_{26.04 30} \\
 & 15 - 24.75 D*V*T_{26.04 30 25} + 5.99 D*V*T_{26.04 60 5} - 21.51 D*V*T_{26.04} \\
 & 60 15 + 15.53 D*V*T_{26.04 60 25} - 27.35 D*V*T_{26.04 90 5} + 18.32 \\
 & D*V*T_{26.04 90 15} + 9.03 D*V*T_{26.04 90 25} - 4.35 D*V*T_{26.04 120 5} + \\
 & 4.15 D*V*T_{26.04 120 15} + 0.19 D*V*T_{26.04 120 25}
 \end{aligned}$$

Donde:

- Intercepto = 155.639
- D = densidad, V= velocidad y T = tiempo.
- D*V, D*T y V*T = interacción de dos factores.

- $D*V*T$ = interacción de tres factores.

e. Decisión estadística

- Si: $p\text{-Value} < \alpha = 0.05$, se rechaza la H_0
- Si: $p\text{-Value} > \alpha = 0.05$, se rechaza la H_0

Acorde a la tabla de ANVA y a un nivel de significancia de 5%, donde se aprecia la interacción de los factores de manera individual ($D = 2e^{-16}$, $V = 2e^{-16}$, $T = 2e^{-16}$), factores conjugado de dos en dos ($D:V = 2e^{-16}$, $D:T = 2e^{-16}$, $V:T = 2e^{-16}$) y tres factores conjugados ($D:V:T = 2e^{-16}$) $< \alpha = 0.05$. Se rechaza la hipótesis nula (H_0) y aceptamos la hipótesis alterna (H_a), es decir qué; “El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el control del ORP en el tratamiento de aguas acidas mineras”.

Hipótesis específica 03: CE

a. Redacción de las hipótesis de investigación y contraste

- **Formulación de la hipótesis alterna y nula**

Ho: El diseño de un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el tratamiento de las aguas acidas mineras.

Ha: El diseño de un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara ineficazmente el tratamiento de las aguas acidas mineras.

- **Formulación de la hipótesis de contraste**

Ho: “No existe diferencia significativa entre los parámetros de aguas acidas mineras de la conductividad eléctrica (CE) antes y después de su tratamiento por el sistema de electrocoagulación con electrodos móviles”. $H_0: \beta_1 = 0$

Ha: “Si existe diferencia significativa entre los parámetros de aguas acidas mineras de la conductividad eléctrica (CE) antes y después de su tratamiento por el sistema de electrocoagulación con electrodos móviles”. $H_a: \beta_1 \neq 0$

b. Nivel de significancia

Se estableció con un error del 5% y un 95% de confiabilidad, es decir:

$$\alpha = 0.05$$

c. Test estadístico

El estadístico aplicado fue un ANVA con un diseño experimental complementa al azar (DCA) considerando un arreglo factorial de la forma 3 x 3 x 4 x 2 con pre test y un post test.

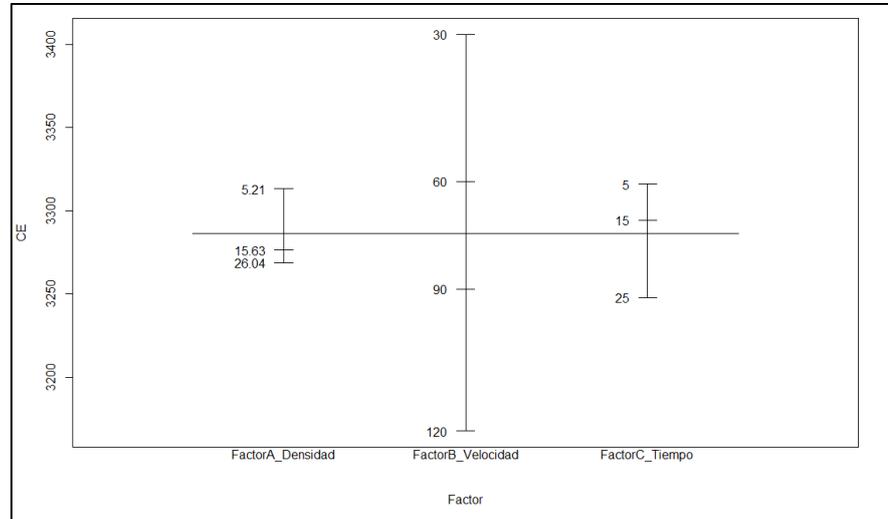
Tabla 14
ANVA de 3 factores del CE

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	27096	13548	27.862	4.88e-08	***
FactorB_Velocidad	3	548835	182945	376.226	< 2e-16	***
FactorC_Tiempo	2	58304	29152	59.951	3.48e-12	***
FactorA_Densidad:FactorB_Velocidad	6	73092	12182	25.052	1.79e-11	***
FactorA_Densidad:FactorC_Tiempo	4	19738	4934	10.148	1.32e-05	***
FactorB_Velocidad:FactorC_Tiempo	6	16035	2672	5.496	0.000402	***
FactorA_Densidad:FactorB_Velocidad:FactorC_Tiempo	12	30783	2565	5.275	4.84e-05	***
Residuals	36	17506	486			

Signif. codes:	0	'***'	0.001	'**'	0.01	'*'
	0.05	'.'	0.1	' '	1	

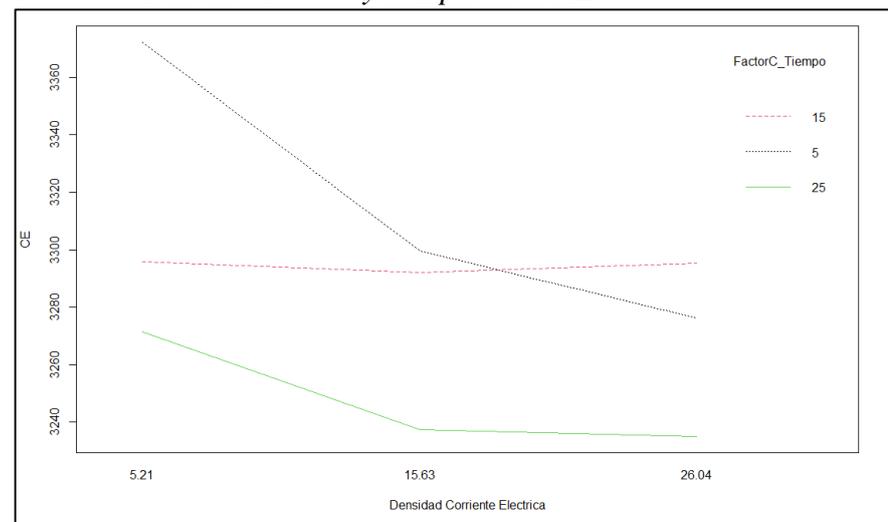
La tabla 14 detalla el ANVA de los 72 tratamientos con dos corridas, referente a conductividad eléctrica (CE), donde se aprecia la interacción de los factores de manera individual ($D = 4.88e^{-08}$, $V = 2e^{-16}$, $T = 3.48e^{-12}$), factores conjugado de dos en dos ($D:V = 1.79e^{-11}$, $D:T = 1.32e^{-05}$, $V:T = 0.000402$) y tres factores conjugados ($D:V:T = 4.84e^{-05}$). Los valores independientes y conjugados representan la influencia de factores sobre la variable respuesta, mostrando una significancia muy alta en intervalos de tiempos de 5 a 25 minutos, densidad de corriente eléctrica de 5.21 a 26.04 A/m² y velocidad angular de 30 a 120 rpm, que afectan al parámetro de la CE.

Gráfico 18
Efectos principales de la CE



El gráfico 18 muestra los efectos principales de la conductividad eléctrica (CE), donde se aprecia que a una densidad de 26.04 A/m² y tiempo de 25 minutos la CE muestra una reducción de 3300 a 3250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y con una velocidad angular de 120 rpm se logra valores menores a 3200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La línea de referencia representa la media de los factores, que indica la reducción de la CE en el intervalo de 3250 a 3200 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Gráfico 19
Interacción de la densidad y tiempo de la CE

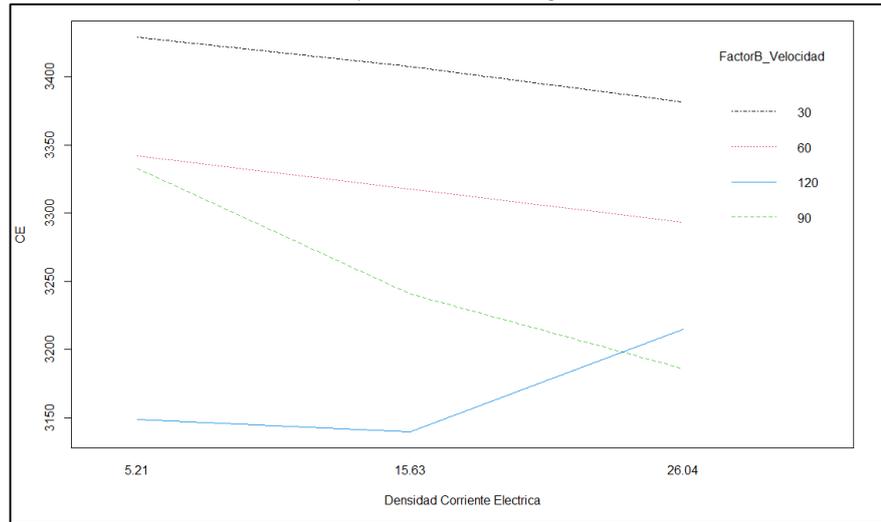


El gráfico 19 muestra los efectos de interacción de los factores conjugados densidad y tiempo, respecto al parámetro conductividad

eléctrica (CE), que, de acuerdo a la línea de color verde, muestra una reducción significativa menor a 3240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de interacción, con 26.04 A/m^2 y 25 minutos respectivamente.

Gráfico 20

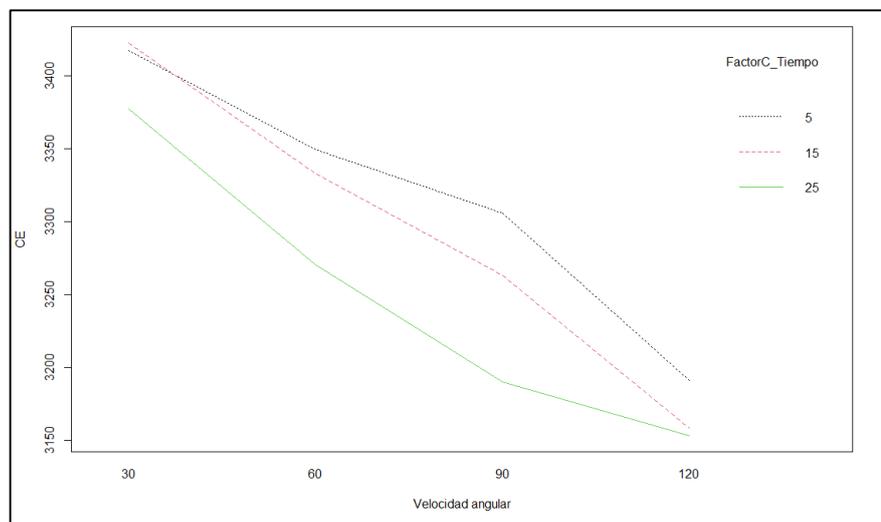
Interacción de la densidad y velocidad angular de la CE



El gráfico 20 muestra los efectos de interacción de los factores conjugados de la densidad y velocidad angular, respecto al parámetro conductividad eléctrica (CE), que, de acuerdo a la línea de color azul, muestra una reducción significativa de interacción, logrando valores menores a 3150 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con 15.63 A/m^2 y 120 rpm respectivamente.

Gráfico 21

Interacción de la velocidad angular y tiempo de la CE



El gráfico 21 muestra los efectos de interacción de los factores conjugados de la velocidad angular y tiempo, respecto al parámetro conductividad eléctrica (CE), que, de acuerdo a la línea de color verde, muestra una reducción significativa de interacción, logrando valores próximos a 3150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con 120 rpm y tiempos de 15 a 25 minutos respectivamente.

Ecuación de regresión lineal: CE vs densidad, velocidad y tiempo:

$$\begin{aligned}
 \text{CE} = & 3288.54 + 24.87 D_{5.21} - 12.08 D_{15.63} - 12.79 D_{26.04} + 117.57 V_{30} + \\
 & 29.24 V_{60} - 26.04 V_{90} - 120.76 V_{120} + 27.75 T_5 + 5.96 T_{15} - 33.71 T_{25} \\
 & - 1.82 D*V_{5.21 30} - 0.49 D*V_{5.21 60} + 45.96 D*V_{5.21 90} - 43.65 D*V_{5.21} \\
 & 120 + 13.64 D*V_{15.63 30} + 11.97 D*V_{15.63 60} - 9.58 D*V_{15.63 90} - 16.03 \\
 & D*V_{15.63 120} - 11.82 D*V_{26.04 30} - 11.49 D*V_{26.04 60} - 36.37 D*V_{26.04} \\
 & 90 + 59.68 D*V_{26.04 120} + 31.58 D*T_{5.21 5} - 23.38 D*T_{5.21 15} - 8.21 \\
 & D*T_{5.21 25} - 4.46 D*T_{15.63 5} + 9.83 D*T_{15.63 15} - 5.37 D*T_{15.63 25} - \\
 & 27.13 D*T_{26.04 5} + 13.54 D*T_{26.04 15} + 13.58 D*T_{26.04 25} - 16.03 V*T_{30} \\
 & 5 + 10.93 V*T_{30 15} + 5.10 V*T_{30 25} + 3.97 V*T_{60 5} + 9.43 V*T_{60 15} - \\
 & 13.40 V*T_{60 25} + 16.25 V*T_{90 5} - 5.29 V*T_{90 15} - 10.96 V*T_{90 25} - 4.19 \\
 & V*T_{120 5} - 15.07 V*T_{120 15} + 19.26 V*T_{120 25} - 24.97 D*V*T_{5.21 30 5} + \\
 & 12.82 D*V*T_{5.21 30 15} + 12.15 D*V*T_{5.21 30 25} - 23.47 D*V*T_{5.21 60 5} + \\
 & 14.82 D*V*T_{5.21 60 15} + 8.65 D*V*T_{5.21 60 25} + 35.58 D*V*T_{5.21 90 5} - \\
 & 23.62 D*V*T_{5.21 90 15} - 11.96 D*V*T_{5.21 90 25} + 12.86 D*V*T_{5.21 120 5} \\
 & - 4.01 D*V*T_{5.21 120 15} - 8.85 D*V*T_{5.21 120 25} + 3.07 D*V*T_{15.63 30 5} \\
 & - 1.89 D*V*T_{15.63 30 15} - 1.18 D*V*T_{15.63 30 25} - 2.43 D*V*T_{15.63 60 5} \\
 & - 4.89 D*V*T_{15.63 60 15} + 7.32 D*V*T_{15.63 60 25} - 32.87 D*V*T_{15.63 90} \\
 & 5 + 16.17 D*V*T_{15.63 90 15} + 16.71 D*V*T_{15.63 90 25} + 32.24 D*V*T_{15.63} \\
 & 120 5 - 9.39 D*V*T_{15.63 120 15} - 22.85 D*V*T_{15.63 120 25} + 21.90 \\
 & D*V*T_{26.04 30 5} - 10.93 D*V*T_{26.04 30 15} - 10.97 D*V*T_{26.04 30 25} + \\
 & 25.90 D*V*T_{26.04 60 5} - 9.93 D*V*T_{26.04 60 15} - 15.97 D*V*T_{26.04 60 25} \\
 & - 2.71 D*V*T_{26.04 90 5} + 7.46 D*V*T_{26.04 90 15} - 4.75 D*V*T_{26.04 90 25} \\
 & - 45.10 D*V*T_{26.04 120 5} + 13.40 D*V*T_{26.04 120 15} + 31.69 D*V*T_{26.04} \\
 & 120 25
 \end{aligned}$$

Donde:

- Intercepto = 3288.54
- D = densidad, V= velocidad y T = tiempo.

- $D*V$, $D*T$ y $V*T$ = interacción de dos factores.
- $D*V*T$ = interacción de tres factores.

d. Decisión estadística

- Si: $p\text{-Value} < \alpha = 0.05$, se rechaza la H_0
- Si: $p\text{-Value} > \alpha = 0.05$, se rechaza la H_0

Acorde a la Tabla de ANVA y a un nivel de significancia de 5%, donde se aprecia la interacción de los factores de manera individual ($D = 4.88e^{-08}$, $V = 2 e^{-16}$, $T = 3.48e^{-12}$), factores conjugado de dos en dos ($D:V = 1.79e^{-11}$, $D:T = 1.32e^{-05}$, $V:T = 0.000402$) y tres factores conjugados ($D:V:T = 4.84e^{-05}$) $< \alpha = 0.05$. Se rechaza la hipótesis nula (H_0) y aceptamos la hipótesis alterna (H_a), es decir qué; “El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el control de la CE en el tratamiento de aguas acidas mineras.”

Hipótesis específica 04: STD

a. Redacción de las hipótesis de investigación y contraste

- **Formulación de la hipótesis alterna y nula**

H₀: El diseño de un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el tratamiento de las aguas acidas mineras.

H_a: El diseño de un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara ineficazmente el tratamiento de las aguas acidas mineras.

- **Formulación de la hipótesis de contraste**

H₀: “No existe diferencia significativa entre los parámetros de aguas acidas mineras de los STD antes y después de su tratamiento por el sistema de electrocoagulación con electrodos móviles”. $H_0: \beta_1 = 0$

H_a: “Si existe diferencia significativa entre los parámetros de aguas acidas mineras de los STD antes y después de su tratamiento por el sistema de electrocoagulación con electrodos móviles”. $H_a: \beta_1 \neq 0$

b. Nivel de significancia

Se estableció con un error del 5% y un 95% de confiabilidad, es decir:

$$\alpha = 0.05$$

c. Test estadístico

El estadístico aplicado fue un ANVA con un diseño experimental complementa al azar (DCA) considerando un arreglo factorial de la forma 3 x 3 x 4 x 2 con pre test y un post test.

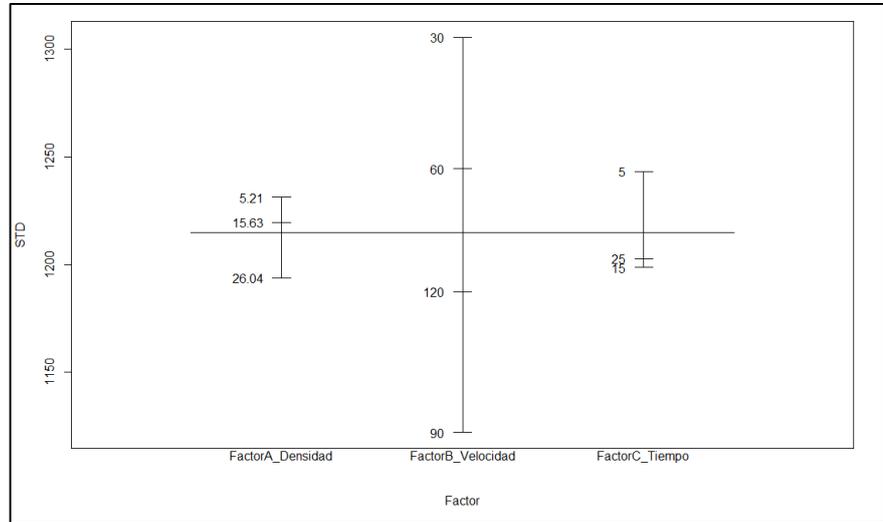
Tabla 15
ANVA de 3 factores del STD

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	12380	6190	276.65	< 2e-16	***
FactorB_Velocidad	3	924263	308088	13769.28	< 2e-16	***
FactorC_Tiempo	2	46137	23069	1030.99	< 2e-16	***
FactorA_Densidad:FactorB_Velocidad	6	18451	3075	137.44	< 2e-16	***
FactorA_Densidad:FactorC_Tiempo	4	6037	1509	67.45	3.18e-16	***
FactorB_Velocidad:FactorC_Tiempo	6	5392	899	40.16	1.64e-14	***
FactorA_Densidad:FactorB_Velocidad:FactorC_Tiempo	12	19043	1587	70.92	< 2e-16	***
Residuals	36	806	22			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

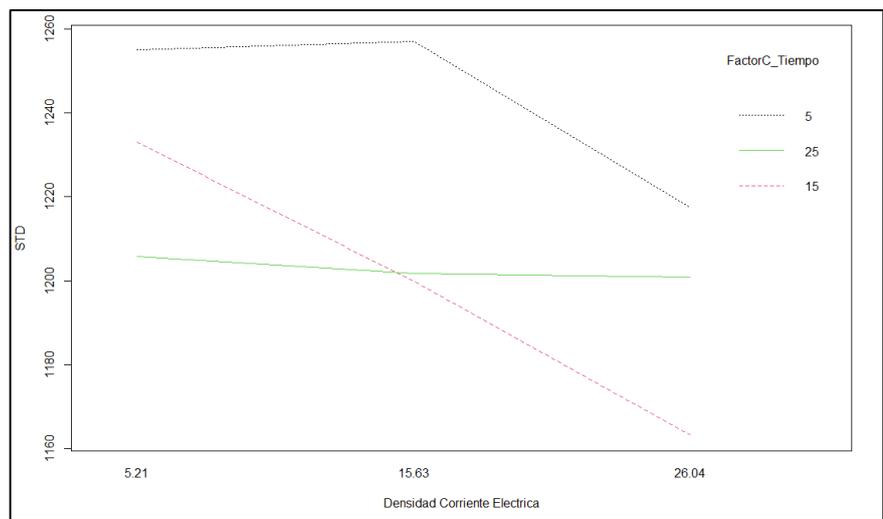
La tabla 15 detalla el ANVA de los 72 tratamientos con dos corridas, referente a STD, donde se aprecia la interacción de los factores de manera individual ($D = 2e^{-16}$, $V = 2e^{-16}$, $T = 2e^{-16}$), factores conjugado de dos en dos ($D:V = 2e^{-16}$, $D:T = 3.18e^{-16}$, $V:T = 1.64e^{-14}$) y tres factores conjugados ($D:V:T = 2e^{-16}$). Los valores independientes y conjugados representan la influencia de factores sobre la variable respuesta, mostrando una significancia muy alta en intervalos de tiempos de 5 a 25 minutos, densidad de 5.21 a 26.04 A/m^2 y velocidad angular de 30 a 120 rpm, que afectan al parámetro STD.

Gráfico 22
Efectos principales de los STD



El gráfico 22 muestra los efectos principales de los STD, donde se aprecia que a una densidad de 26.04 A/m² y tiempo de 15 minutos los STD muestra una reducción de 1200 a 1150 ppm, y con una velocidad angular de 90 rpm se logra valores menores a 1150 ppm. La línea de referencia representa la media de los factores, que indica la reducción de los STD en el intervalo de 1250 a 1200 ppm.

Gráfico 23
Interacción de la densidad y tiempo de los STD

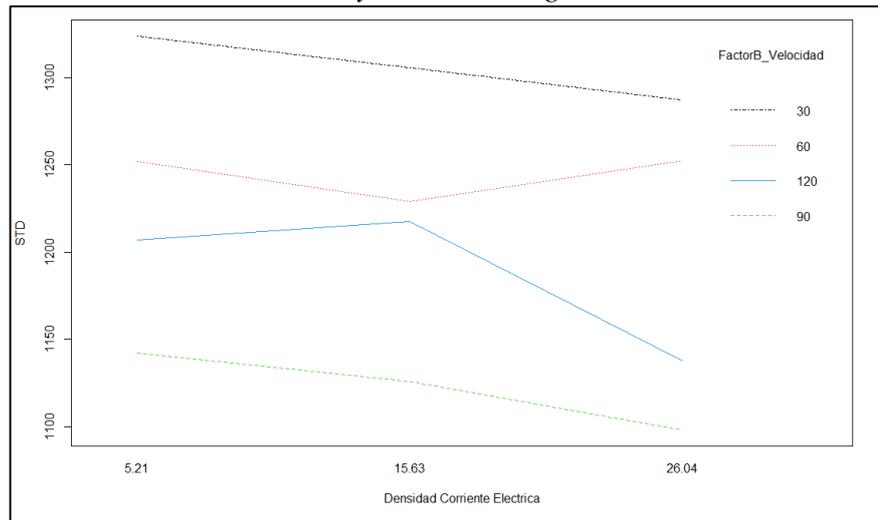


El gráfico 23 muestra los efectos de interacción de los factores conjugados de la densidad y tiempo, respecto al parámetro STD, que,

de acuerdo a la línea de color rojo, muestra una reducción significativa de 1180 a 1160 ppm de interacción, con 26.04 A/m² y 15 minutos respectivamente.

Gráfico 24

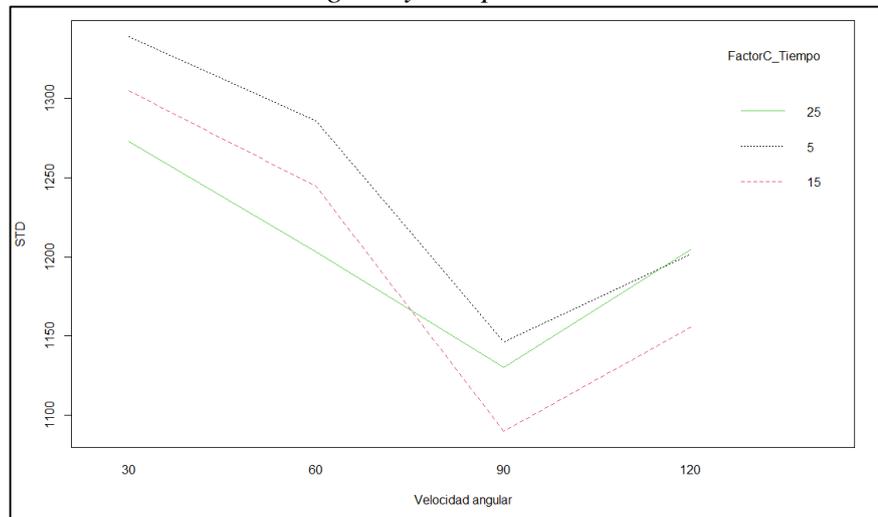
Interacción de la densidad y velocidad angular de los STD



El gráfico 24 muestra los efectos de interacción de los factores conjugados de la densidad y velocidad angular respecto al parámetro STD que, de acuerdo a la línea de color verde, muestra una reducción significativa de interacción en el intervalo de 1150 a 1100 ppm, con 26.04 A/m² y 90 rpm respectivamente.

Gráfico 25

Interacción velocidad angular y tiempo de los STD



El gráfico 25 muestra los efectos de interacción de los factores conjugados de la velocidad angular y tiempo, respecto al parámetro STD que, de acuerdo a la línea de color rojo, muestra una reducción significativa de interacción, logrando valores menores a 1100 ppm con 90 rpm y tiempo de 15 minutos respectivamente.

Ecuación de regresión lineal: STD vs densidad, velocidad y tiempo:

$$\begin{aligned}
 \text{STD} = & 1169.29 + 17.000 D_{.5.21} - 2.083 D_{.15.63} - 14.917 D_{.26.04} + 136.264 V_{.30} \\
 & + 76.486 V_{.60} - 60.014 V_{.90} - 152.736 V_{.120} + 32.500 T_{.5} - 3.250 T_{.15} \\
 & - 29.250 T_{.25} + 1.28 D*V_{.5.21\ 30} - 10.78 D*V_{.5.21\ 60} + 15.89 D*V_{.5.21\ 90} - \\
 & 6.39 D*V_{.5.21\ 120} + 2.19 D*V_{.15.63\ 30} - 14.69 D*V_{.15.63\ 60} + 18.97 D*V_{.15.63\ 90} \\
 & - 6.47 D*V_{.15.63\ 120} - 3.47 D*V_{.26.04\ 30} + 25.47 D*V_{.26.04\ 60} - 34.86 D*V_{.26.04\ 90} \\
 & + 12.86 D*V_{.26.04\ 120} - 2.29 D*T_{.5.21\ 5} + 6.96 D*T_{.5.21\ 15} - 4.67 D*T_{.5.21\ 25} \\
 & - 3.83 D*T_{.15.63\ 5} + 10.92 D*T_{.15.63\ 15} - 7.08 D*T_{.15.63\ 25} + 6.13 D*T_{.26.04\ 5} \\
 & - 17.88 D*T_{.26.04\ 15} + 11.75 D*T_{.26.04\ 25} + 0.94 V*T_{.30\ 5} + 2.53 V*T_{.30\ 15} \\
 & - 3.47 V*T_{.30\ 25} + 7.56 V*T_{.60\ 5} + 1.97 V*T_{.60\ 15} - 9.53 V*T_{.60\ 25} + 4.56 V*T_{.90\ 5} \\
 & - 16.19 V*T_{.90\ 15} + 11.64 V*T_{.90\ 25} - 13.06 V*T_{.120\ 5} + 11.69 V*T_{.120\ 15} + 1.36 V*T_{.120\ 25} \\
 & + 1.01 D*V*T_{.5.21\ 30\ 5} - 9.57 D*V*T_{.5.21\ 30\ 15} + 8.56 D*V*T_{.5.21\ 30\ 25} - 15.76 D*V*T_{.5.21\ 60\ 5} \\
 & - 0.18 D*V*T_{.5.21\ 60\ 15} + 15.94 D*V*T_{.5.21\ 60\ 25} + 1.07 D*V*T_{.5.21\ 90\ 5} \\
 & + 11.82 D*V*T_{.5.21\ 90\ 15} - 12.89 D*V*T_{.5.21\ 90\ 25} + 13.68 D*V*T_{.5.21\ 120\ 5} \\
 & - 2.07 D*V*T_{.5.21\ 120\ 15} - 11.61 D*V*T_{.5.21\ 120\ 25} + 1.72 D*V*T_{.15.63\ 30\ 5} \\
 & - 12.86 D*V*T_{.15.63\ 30\ 15} + 11.14 D*V*T_{.15.63\ 30\ 25} - 14.22 D*V*T_{.15.63\ 60\ 5} \\
 & - 5.14 D*V*T_{.15.63\ 60\ 15} + 19.36 D*V*T_{.15.63\ 60\ 25} - 4.39 D*V*T_{.15.63\ 90\ 5} \\
 & + 14.86 D*V*T_{.15.63\ 90\ 15} - 10.47 D*V*T_{.15.63\ 90\ 25} + 16.89 D*V*T_{.15.63\ 120\ 5} \\
 & + 3.14 D*V*T_{.15.63\ 120\ 15} - 20.03 D*V*T_{.15.63\ 120\ 25} - 2.74 D*V*T_{.26.04\ 30\ 5} \\
 & + 22.43 D*V*T_{.26.04\ 30\ 15} - 19.69 D*V*T_{.26.04\ 30\ 25} + 29.99 D*V*T_{.26.04\ 60\ 5} \\
 & + 5.32 D*V*T_{.26.04\ 60\ 15} - 35.31 D*V*T_{.26.04\ 60\ 25} + 3.32 D*V*T_{.26.04\ 90\ 5} \\
 & - 26.68 D*V*T_{.26.04\ 90\ 15} + 23.36 D*V*T_{.26.04\ 90\ 25} - 30.57 D*V*T_{.26.04\ 120\ 5} \\
 & - 1.07 D*V*T_{.26.04\ 120\ 15} + 31.64 D*V*T_{.26.04\ 120\ 25}
 \end{aligned}$$

Donde:

- Intercepto = 1169.29
- D = densidad, V= velocidad y T = tiempo.
- D*V, D*T y V*T = interacción de dos factores.

- $D*V*T$ = interacción de tres factores.

d. Decisión estadística

- Si: $p\text{-Value} < \alpha = 0.05$, se rechaza la H_0
- Si: $p\text{-Value} > \alpha = 0.05$, se rechaza la H_0

Acorde a la tabla de ANVA y a un nivel de significancia de 5%, donde se aprecia la interacción de los factores de manera individual ($D = 2e^{-16}$, $V = 2e^{-16}$, $T = 2e^{-16}$), factores conjugado de dos en dos ($D:V = 2e^{-16}$, $D:T = 3.18e^{-16}$, $V:T = 1.64e^{-14}$) y tres factores conjugados ($D:V:T = 2e^{-16}$) $< \alpha = 0.05$. Se rechaza la hipótesis nula (H_0) y aceptamos la hipótesis alterna (H_a), es decir que; “El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el control de los STD en el tratamiento de aguas acidas mineras

Conclusiones

Cabe señalar que existe diferencias muy significativas entre el diseño convencional (electrodos estáticos) con el diseño emergente (electrodos móviles) debido a su composición geométrica del rotor de los electrodos y garantiza un mejor control de análisis en los parámetros, mediante la interacción de efectos principales, regulando a los factores dependientes en beneficio de la variable efecto.

El sistema demostró una buena eficiencia en el tratamiento de parámetros conjugados como es el caso del pH y ORP que al incrementar o disminuir el OH^- se puede controlar la acidificación o alcalinización de un DAM. Por otro lado, lo mismo sucede con la CE y STD que al realizar los mismos procesos, están también tienden a subir y bajar la carga metálica coloidal pesada de manera directa o inversamente proporcional.

Por consiguiente, también se demostró que la tecnología convencional solo recurre en su mayor parte; solo el manejo de dos factores (densidad de corriente eléctrica “DCE” y tiempo) como base principal en el análisis de tratamientos, lo cual implica limitaciones al proyectar modelos lineales de predicción. El sistema emergente maneja más de dos factores de control (Densidad, tiempo de retención, velocidad angular, volumen, temperatura) que representan mayor efectividad en diseño y modelación lineal para predicciones futuras.

Otro efecto que se demostró fue el considerar en la fase líquida, la reducción y la acumulación de sarro en los electrodos, debido a los giros programados de manera constante (revoluciones/minuto). Debido a esta reacción se observó que el electrodo de fierro y/o acero se degrada y corroe muy fácilmente por lo que manteniendo una polaridad estable genera mayor cantidad de lodos metálicos pesados a comparación del aluminio. En base a lo sustentado cabe mencionar que los procesos de tratamiento electrolíticos toman ventajas en el tamaño y reducción de los procesos unitarios y representan sistemas más ecoeficientes.

Recomendaciones

- A los maestrandos, considerar a las dos tecnologías como técnicas emergentes verdes, siendo esta última (electrodos móviles) la más eficiente en el control de factores y efectos de interacción multivariable preferentemente en el tratamiento de aguas residuales del tipo industrial.
- A los estudiantes de pre grado considerar esta patente como una base de diseño para futuras patentes basadas en energías renovables.
- Se recomienda no usarla en el tratamiento de aguas saladas ya que incrementa el número de iones en la disolución dando a la corriente eléctrica una manera más fácil de conducirse de y los procesos de neutralización serán mínimos.
- Se recomienda realizar más estudios minuciosos de análisis, debido a la escasa bibliografía en esta patente.
- Es recomendable utilizar cuatro procesos unitarios; primero un proceso de electrocoagulación, segundo proceso el de electrofloculación, tercer proceso de electrodecantación y por ultimo un proceso de filtración, para mayor efectividad.
- Promover y desarrollar; “líneas de investigación en el área del tratamiento de aguas residuales industriales mediante el método de electroquímica”, mediante el uso de electrodos móviles como una técnica ecoeficiente.

Referencias bibliográficas

- Aduvire, H., & Aduvire, O. (2005). Aguas ácidas de mina caracterización, mineralogía y microbiología. *Revista Ingeopres*, 52-62.
- Aduvire, H., López Jimeno, C., & Aduvire, O. (2012). Inventory and risk assessment using a Pc during closure procedure of abandoned mines. *IMWA Proccedings*, 821-824.
- Aduvire, O. (2006). *Drenaje acido de mina generación y tratamiento*. Madrid, Mexico: Instituto Geológico y Minero de España.
- Aguilar, E. (17 de Abril de 2015). Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. (I. d. Lima., Ed.) *Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM*, 73.
- Arcones, M. A., & Wang, Y. (2006). Some new tests for normality based on U-processes. *Readalyc.org*, 69-82.
- Arévalo Aranda, C. (2016). *Influencia de la densidad de corriente y tiempo de residencia en la reducción de arsénico de efluentes artificiales mediante el proceso de electrocoagulación*. Trujillo, Perú: Universidad Nacional de Trujillo.
- Bauer, W., & Westfall, G. (2018). *Física para ingeniería y ciencias con física moderna*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Bermudez Errazuriz, M. D., & Salazar Cuellar, S. A. (2019). *Aplicación de fotocátalisis heterogénea y electrocoagulación en depuración de cromo y cadmio en agua residual proveniente de una industria metalmecánica*. Guayaquil, Colombia: Universidad de Guayaquil.
- Blass Amador, G., & Panamá Tirado, L. A. (2017). Aplicación de electrocoagulación para eliminación de silicio en agua de enfriamiento. *Revista AIDIS*, I(2). doi:DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2007.1.2.14388>
- C.C., L. (2005). *Environmental Engineerring Dictionary*. Lanham, Maryland, Toronto, Oxford: The Acarecrow Press, Inc.
- Cabrera Bermúdez, X., Fleites Ramírez, M., & Contreras Moya, A. M. (2009). Estudio del Proceso De Coagulaciónfloculación de Aguas Residuales de La Empresa

- Textil "Desembarco Del Granma" A Escala de Laboratorio. *Redalyc.org*, 64-73.
- Cabrera Hernandez, J., & Martinez Cruz, G. (2012). *Electroquímica*. México: Cautitlán.
- Calderón, M., & Aramburú, V. (Junio de 2017). Estudio de la electrocoagulación para controlar la turbiedad y el pH en el tratamiento de efluentes minero metalúrgicos polimetálicos. (U. N. Marcos, Ed.) *Revista del Instituto de Investigación, FIGMMG –UNMSM*, 20(39), 122.
- Camacho Ramírez, C. D., Forero Ávila, M. A., Agudelo Valencia, R. N., & Garcés Polo, S. I. (20 de Febrero de 2021). Evaluación de la reducción de la concentración de cefalexina en solución acuosa por electrocoagulación con electrodos de grafito a diferentes valores de pH inicial e intensidad de corriente aplicada. *Revista INVENTUM*, XVI(30), 54-60. doi:doi:10.26620/uniminuto.inventum.16.30.2021.54-60
- Candorin, L., Carissimi, E., & Rubio, J. (28 de Septiembre de 2007). Avances en el Tratamiento de Aguas Ácidas de Minas. (U. T. Pereira, Ed.) *Scientia et Technica Año XIII*, 854.
- Canteli, P., Arranz, J., & Aduvire, O. (2003). Abandoned mines Spain: environmental, technical and legal needs. *ECI International Conference on Green Brownfields II*, 15-19.
- Cañizares, P., Sáez, C., Lobato, J., & Rodrigo, A. (2004). Electrochemical Treatment of 4-Nitrophenol-Containing Aqueous Wastes Using Boron-Doped Diamond Anodes. *Industrial & Engineering*, 9-43.
- Carhuancho Alcantara, H. M., & Salazar Escobar, J. L. (2015). *Estudio del efecto de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales a nivel de laboratorio en la planta de tratamiento de aguas residuales covicorti en la ciudad de Trujillo – La Libertad*, Perú: Universidad Nacional de Trujillo.
- Castañeda Hilario, D. M. (2018). *Estudio de la densidad de corriente y tiempo de residencia en el proceso de electrocoagulación y su influencia en la reducción Fe^{2+} de solución de drenaje ácido de mina*. Tesis, Universidad Nacional de Trujillo, Perú.
- Chang, R. (2007). *Electro química*. Londres: McGraw Hill.

- Correa, J. C., Iral, R., & Rojas, L. (2009). Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de varianza. *Redalyc.org*, 57-76.
- Covaleda Olave, M. N., & Hoyos Alvarez, C. A. (2018). *Diseño y construcción de un prototipo de reactor tipo batch a escala de laboratorio para la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales*. Montería: Universidad de Córdoba.
- Díaz de León, C. G., & León De La Garza, E. A. (2010). *Método Comparativo*. Monterrey, México: UANL.
- Díaz Rodríguez, K. F. (2017). *Evaluación de un tratamiento electroquímico con electrodos recubiertos con bentonita para la remoción de Hg (II)*. Arequipa, Perú: Universidad Católica de Santa María.
- Durante Yanez, E. V. (2016). *Tratamiento por electrocoagulación de aguas de cianuración generadas en el beneficio del oro en una zona minera del sur de Bolívar, Colombia*. Montería, Córdoba: Universidad de Córdoba.
- Feria Díaz, J. J., Escobar Aguado, A. E., & Antonio Martínez, J. (21 de Junio de 2014). Tratamiento de aguas residuales de origen químico mediante electrocoagulación. *AVANCES Investigación en Ingeniería*, XI, 65-69.
- Ferniza García, F. (2017). *Eficiencia de un sistema acoplado electrocoagulación fitorremediación para la remoción de Pb, Cu, Cd y Zn, presentes en efluentes mineros*. Tesis, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Forero Buitrago, G. A. (2018). Electrocoagulación para la desalinización del agua de mar. *Revista de Tecnología Journal of Technology*, 17(1), 94-99. doi:<https://doi.org/10.18270/rt.v17i1.2956>
- Fynde. (3 de Marzo de 2018). *Blog Fibras y Normas de Colombia S.A.S*. Obtenido de <https://acortar.link/TKhKLR>
- García Vaca, M. C., García Ubaque, C. A., & De Plaza Solórzano, J. S. (Junio de 2016). Estudio exploratorio del tratamiento de agua de lavado de tintas por método de electrocoagulación/electroflotación. *Revista Tecnura*, 20(47). doi:<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.1.a09>
- Gilpavas, E. (2008). *Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales*. Medellín, Colombia: Universidad EAFIT.
- Gonzales Paredes, E., & Malca Yopla, M. (2019). *Influencia del amperaje y tiempo de residencia sobre el porcentaje de remoción de metales pesados en el*

- tratamiento de aguas ácidas de minera Yanacocha S.R.L. por electrocoagulación, 2018.* Cajamarca, Perú: Universidad Privada del Norte.
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. DE C.V.
- Jaramillo Páez, C., Jaramillo Giraldo, A., & Taborda Ocampo, G. (2015). Construcción de un reactor electroquímico para electrocoagulación como método alternativo en la descontaminación de aguas residuales. *Revista Universidad de Caldas*, 145-158.
- Jiménez López, J. E., & Real, O. J. (2013). Depuración Electroquímica de Aguas Residuales Provenientes de una Planta De Tratamiento de Vinazas Tequileras. *Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química (AMIDIQ)*, 3015-3020.
- Linares Hernández, I., Martínez Miranda, V., Barrera Díaz, C., Pavón Romero, S., Bernal Martínez, L., & Lugo Lugo, V. (2011). *Oxidación de materia orgánica persistente en aguas residuales industriales mediante tratamientos electroquímicos*. Toluca, México: Avances en Ciencias e Ingeniería (ACI).
- Londoño Franco, L. F., Londoño-Muñoz, P. T., & Muñoz García, F. G. (2016). Los Riesgos de los Metales Pesados en la Salud Humana y Animal. *lflondono*.
- López Hernández, K., & Vargas Veloza, V. (2018). *Evaluación de la eficiencia de remoción de Ag⁺, Ni (II) y Cu (II) de aguas residuales del sector galvanico mediante electrocoagulación*. Bogotá, Colombia: Universidad el Bosque.
- Lorenzo Acosta, Y. (2009). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación - floculación. *Redalyc.org*, 10-17.
- Malca Yopla, M. N., Gonzales Paredes, E. E., Farfán Chilicaus, G. C., & Licapa Redolfo, G. S. (2019). Influencia del amperaje y tiempo de residencia sobre la remoción de metales pesados en aguas ácidas por electrocoagulación. *Rev. Perspectiv*, 433-440. doi:DOI: <https://doi.org/10.33198/rp.v20i2.00056>
- Marrugo Negrete, J. L., Pinedo Hernandez, J. J., & SánchezCastellon, J. G. (2014). Remoción de mercurio en agua residual minera por la técnica electrocoagulación. (U. d. Córdoba, Ed.) *Memorias del II Seminario de Ciencias Ambientales Sue-Caribe & VII Seminario Internacional de Gestión Ambiental.*, 168-171.

- Martínez, Y., & Hernández, R. (2005). *Electroquímica energía y ambiente*. Merida, Venezuela: Smart Service C.A. .
- Mayta, R., & Mayta, J. (2017). Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación. *Revista Sociedad Química del Perú*, 331-341.
- Michael, P. (2018). Gestión y tratamiento de agua en la explotación minera y en rehabilitación. *Horizonte Minero*, 124. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/329253622>
- Mohd Razali, N., & Bee Wah, Y. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Redalyc.org*.
- Mollah, M., Schennach, R., Parga, J., & Cocke, D. (1 de June de 2001). “Electrocoagulation (EC)- Science and applications. *ELSEVIER*, 29-41. doi:[https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5)
- Morin, K., & Hutt, N. (2011). Relocation of net-acid-generating waste to improve post-mining water. *Waste Management*, 21(2), 185-190.
- Niño Rojas, V. (2011). *Metodología de La Investigación Diseño y Ejecución*. Colombia: Ediciones de la U.
- Nordstrom, K., & Alpers, C. (2000). Negative pH, efflorescent mineralogy, and consequences for environmental restoration at the Iron Mountain superfund. *Natural Academy Science*, 96, 3455-3462.
- Ñaupas Paitán, H., Mejía Mejía, E., Novoa Ramírez, E., & Villagomez Páucar, A. (2014). *Metodología de la Investigación Cuantitativa - Cualitativa y Redacción de la Tesis*. Colombia: Ediciones de la U .
- Ojeda Armaignac, E., & Hing Cortón, R. (2009). Tratamiento por electrocoagulación y coagulación–floculación de la vinaza de destilerías. *Tecnología Química*, XXIX.
- Pall, C. (2012). *Tecnologías de Separación y Filtración para Tratamiento de Aguas en Minería*. (E. A. Future, Ed.) Washington, EE.UU.: Copyright 2012, Pall Corporation.
- Pedrosa, I., Juarros Basterretxea, J., Robles Fernández, A., Basteiro, J., & García Cueto, E. (2014). Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar? *Redalyc.org*, 40-62.

- Piedra Granda, N. D., & Zambrano Vargas, Y. A. (2019). “*Aplicación de electroquímica en la remoción de contaminantes presentes en aguas residuales generadas de una planta procesadora de material minero*”. Ecuador: Universidad de Guayaquil.
- Pinzón Bedoya, M. L., & Vera Villamizar, L. E. (2010). Modelamiento de La Cinética de Bioadsorción de Cr (Iii) Usando Cáscara de Naranja. *Dyna*, 95-106.
- Porto Huaquipaco, H. (2014). *Evaluación de la remoción de arsénico por electrocoagulación de aguas mineras*. Puno, Perú: Universidad Nacional del Altiplano.
- Prieto García, F., Callejas Hernández, J., Reyes Cruz, V. E., Marmolejo Santillán, Y., & Prieto Méndez, J. (2014). Electrodisolución de electrodos de aluminio durante la electrocoagulación de un lactosuero ácido. *Revista DYNA*, pp. 129-136. doi:<http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v81n187.40757>
- Pruton, C. F., & Maron, S. H. (2006). *Fundamentos de Fisicoquímica*. Mexico: LIMUSA S.A.
- Quispe Quispe, K. (2015). *Electrocoagulación en la remoción de mercurio de las aguas residuales en el Centro Poblado la Rinconada Puno*. Puno, Perú: Universidad Nacional del Altiplano.
- Rajeshwar, K. (1997). *Environmental electrochemistry fundamentals and applications*. San Diego, California: Copyright © Academic Press, INC.
- Rajeshwar, K. (1997). *Environmental Electrochemistry: Fundamentals and Applications in Pollution Abatement*. San Diego, California: Academic Press.
- Rámirez Gonzáles, A. (2006). *Metodología de la Investigación Científica*. Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Restrepo Mejía, A. P., Arango Ruiz, Á., & Garcés Giraldo, L. F. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción Limpia*, I(2), 58-77.
- Robles Mendoza, L. K., & López Bueno, A. F. (2017). Diseño de un prototipo para el tratamiento de aguas r o de aguas residuales esiduales. *Ciencia Unisalle*, 137-140.
- Rodríguez Pozueta, M. A. (2018). *Máquinas Eléctricas II*. España: Open Course Ware.

- Rojas Vargas, A., Penedo Medina, M., Ojeda Armaignac, E., & Riveron Aymara, R. (2020). Remoción de níquel por electrocoagulación del sistema Ni(II)-NH₃-CO₂-SO₂-H₂O con electrodos de aluminio. *Tecnología Química*, VX(2).
- Ruiz Bello, P. S. (2017). *Prototipo de una Celda de Electrocoagulación Abastecida con Energía Fotovoltaica para Tratamiento de Aguas Residuales en la Industria Minera*. Bogota, Colombia: Corporación Universitaria Minuto de Dios.
- Sánchez Carlessi, H. H., Reyes Romero, C., & Mejía Sáenz, K. (2018). *Manual de términos en investigación científica, tecnológica y humanística*. Lima: Bussiness Support Aneth S.R.L.
- Skousen, J., Simmons, J., McDonald, M., & Ziemkiewicz P. (2002). Acid base accounting to predict post mining drainage quality on surface mines. *Journal Environmental Quality*, 31(6), 2034-2044.
- Tamayo, M. (2005). *El proceso de la investigación científica*. Mexico: Limusa.
- Terán Chilon, J. A. (2019). *Tratamiento de drenaje ácido de mina, por electrólisis para la remoción de plomo, Hualgayoc – Cajamarca 2019*. Cajamarca, Perú: Universidad Privada del Norte.
- Tippens, P. (2010). *Física conceptos y aplicaciones* (Vol. VII). México: McGRAW-HILL.
- Vasquez Castillo, M. B. (2016). *Estadística aplicada a la ingeniería y los negocios*. Lima: Fondo Editorial.
- Velazquez, R. (2016). *Metodología de La Investigacion Cientifica*. Lima: San Marcos.
- Wilson, A. (7 de Julio de 2004). Control de pH para Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 95.
- Zhenlian Qi, Q., Shijie, Y., & Nanqi, R. (2017). Electrocoagulación inalámbrica en tratamiento de agua basada en electroquímica bipolar. *ELSEVIER*, 96-101.

Anexos

Matriz de consistencia

SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN CON ELECTRODOS MÓVILES PARA TRATAMIENTO DE AGUAS ACIDAS MINERAS HUANCAVELICA

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
¿El diseño de un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el tratamiento de aguas acidas mineras?	Diseñar un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en el tratamiento de las aguas acidas mineras.	El diseño de un sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el tratamiento de las aguas acidas mineras.	Variable Independiente (causa): Sistema de Electrocoagulación: Densidad de CE	Tipo: Aplicativo Nivel: Explicativo Método general: Experimental Método específico: Comparativo Diseño: O1 X O2
PROBLEMAS ESPECÍFICOS: ¿El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles modifica eficazmente el pH en el tratamiento de aguas acidas mineras?	OBJETIVOS ESPECÍFICOS: Estimar la eficiencia del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en el control del pH en el tratamiento de aguas acidas mineras.	HIPÓTESIS ESPECIFICO: El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el control del pH en el tratamiento de aguas acidas mineras.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 5.21 Amp/m² ▪ 15.63 Amp/m² ▪ 26.04 Amp/m² Velocidad angular <ul style="list-style-type: none"> ▪ 30 rpm ▪ 60 rpm ▪ 90 rpm ▪ 120 rpm Tiempo <ul style="list-style-type: none"> ▪ 05 min ▪ 15 min ▪ 25 min 	Diseño Pretest y Postest con un solo grupo. (Sánchez, 2018) Donde: X: Presencia de variable independiente o experimental O ₁ : Pretest O ₂ : Postest Significancia: Al 95%
¿El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles modifica eficazmente del ORP en el tratamiento de aguas acidas mineras Huancavelica?	Estimar la eficiencia del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en el control del ORP en el tratamiento de aguas acidas mineras.	El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el control del ORP en el tratamiento de aguas acidas mineras.	Variable Dependiente (efecto): Parámetros del DAM	Técnica: Observación Experimental Población: Aguas acidas de mina MILLPO. Muestra: 1 Litros de Aguas acidas.
¿El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles modifica eficazmente la conductividad en el tratamiento de aguas acidas mineras?	Estimar la eficiencia del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en el control de la CE en el tratamiento de aguas acidas mineras.	El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el control de la CE en el tratamiento de aguas acidas mineras.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH ▪ ORP ▪ CE ▪ STD 	Método: Muestreo no probabilístico (no aleatoria) de tipo intencional (se basa en la selección de casos que serán más convenientes para el propósito del estudio)
¿El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles modifica eficazmente los STD en el tratamiento de aguas acidas mineras?	Estimar la eficiencia del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles en el control de los STD en el tratamiento de aguas acidas mineras.	El sistema de electrocoagulación con electrodos móviles realizara eficazmente el control de los STD en el tratamiento de aguas acidas mineras.		

Panel fotográfico



Diseño y cortado de las placas de aluminio.



Perforación de placas para conexiones



Perforacion para conexión entre electrodos.



Lijado y limpieza de electrodos.



Dimnesionamiento de placas.



Aislamiento de energia entre placas.



Placas diseñadas.



Conexión entre placas.



Electrodos conectados (anodo y catodo)



Electrodos dispuestos para pruebas.



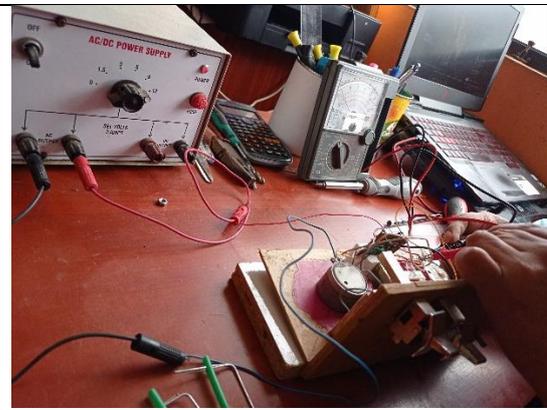
Prueba de energía en los electrodos.



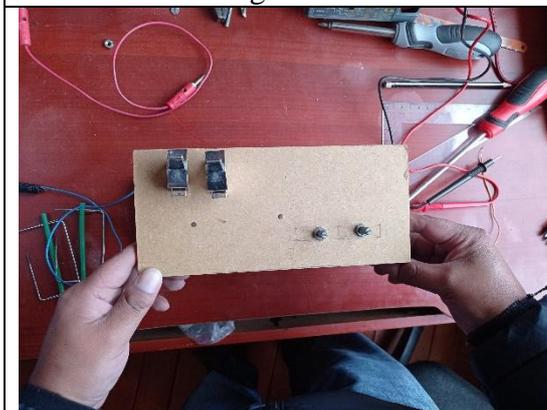
Diseño de soporte para los electrodos.



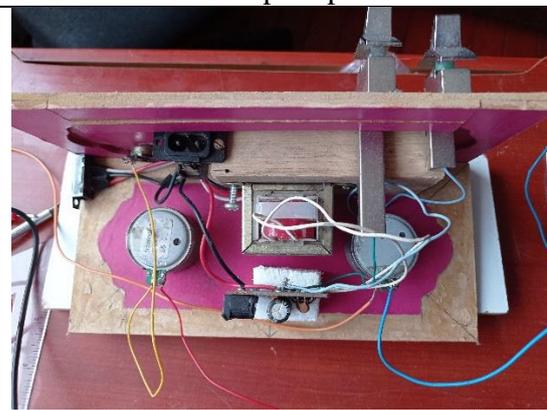
Diseño y ensamblado de los rotores de giro.



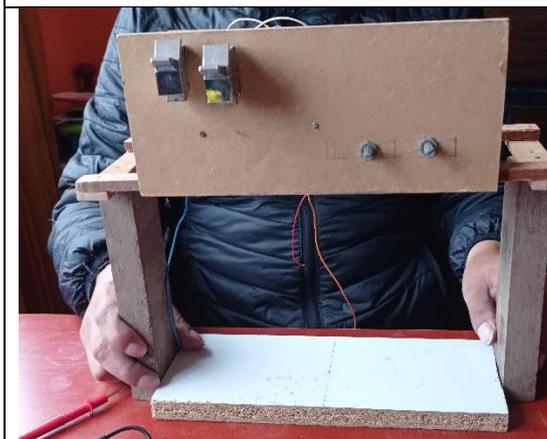
Prueba de energía para rotores de giro en vasos de precipitación.



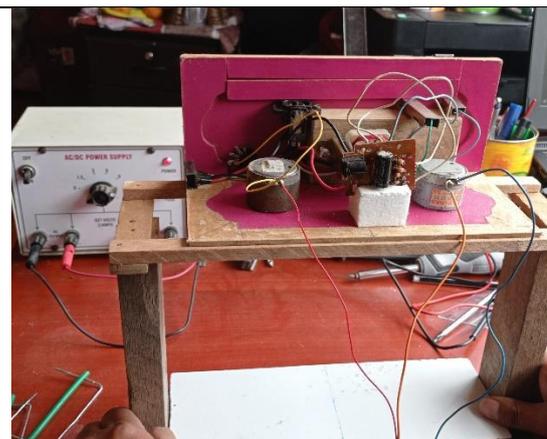
Ensamblado de cambios de velocidad.



Rotor ensamblado para 4 velocidades.



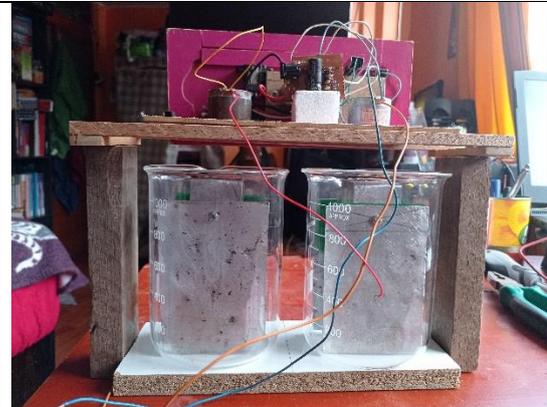
Vista de frontal del sistema de electrocoagulación.



Vista de posterior del sistema de electrocoagulación.



Sistema acoplado para pruebas vista frontal.



Sistema acoplado para pruebas vista posterior.



Realizando pruebas de calibración de multiparametro para pruebas iniciales.



Realizando conexiones de intensidad de electricidad para pruebas iniciales.



Preparando muestra de 1 Litro del DAM para tratamiento



Controlando el voltaje de energia electrica en las placas con el multimetro.



Midiendo parametros pH, ORP, STD y CE en prueba pretest .



Midiendo parametros en prueba pretest en movimiento. .



Resultados posttest (lado izquierdo con 90 rpm)



Realizando sedimentación y medición de parametro.



Realizando filtrado y limpieza de lodos.



Registrando los resultados de posttest.



Lodos generados del proceso de electrocoagulación con electrodos móviles.

Reporte de resultados

Programación de paquetes para El programa Rstudio V. 4.03

```
1 #PARA 3 FACTORES#
2 #INTRODUCCIÓN DE DATOS pH
3 pH<-read.table("clipboard",header=T)
4 pH
5 attach(pH)
6 names(pH)
7 str(pH)
8 summary(pH)
9 # Cambio de variables
10 FactorA_Densidad <- factor(Densidad)
11 FactorB_Velocidad <- factor(Velocidad)
12 FactorC_Tiempo <- factor(Tiempo)
13 Respuesta_pH <- pH$pH
14
15 # Cálculo de la tabla ANOVA
16 Modelo <- lm(Respuesta_pH ~ (FactorA_Densidad + FactorB_Velocidad + FactorC_Tiempo)^3)
17
18 ANOVA <- aov(Modelo)
19 summary(ANOVA)
20
21 # Coeficientes de la ecuación de regresión
22 coef(ANOVA)
23 # Gráficas de los efectos principales
24 Efectos <- data.frame(FactorA_Densidad, FactorB_Velocidad, FactorC_Tiempo, Respuesta_pH)
25 plot.design(Efectos, fun="mean", main=" Gráfica de Efectos Principales", ylab= "pH", xlab="Factor")
26 # Gráfica de interacción 1
27 interaction.plot(FactorA_Densidad, FactorB_Velocidad, Respuesta_pH,
28                 main="Interacción Densidad de Corriente Electrica - Tiempo", xlab="Densidad Corriente Electrica", ylab="pH", col=c(1:4))
29 # Gráfica de interacción 2
30 interaction.plot(FactorA_Densidad, FactorC_Tiempo, Respuesta_pH,
31                 main="Interacción Densidad de Corriente Electrica - Velocidad", xlab="Densidad Corriente Electrica", ylab="pH", col=c(1:4))
32 # Gráfica de interacción 3
33 interaction.plot(FactorB_Velocidad, FactorC_Tiempo, Respuesta_pH,
34                 main="Interacción Tiempo - Velocidad", xlab="Densidad Corriente Electrica", ylab="pH", col=c(1:4))
35 # Análisis de los residuos estándar del modelo
36 plot(rstandard(Modelo),
37      main="Gráfica de residuos estándar",
38      xlab="Observación", ylab="Residuos estandarizados")
39
40 ## No se observan problemas con los datos
41 qqnorm(rstandard(Modelo))
42 qqline(rstandard(Modelo), col="red")
43 shapiro.test(rstandard(Modelo))
44 bartlett.test(pH)
45 # Los residuos se comportan de forma normal, no se observan problemas con los datos
46
47 # Para ver los valores ajustados por la regresión:
48 fitted(Modelo)
49
50 # Graficando los valores tanto los ajustados como los reales
51 plot(fitted(Modelo),
52      Respuesta_pH, col=c("red", "blue"), pch=20,
53      main="Gráfica de valores ajustados y reales",
54      ylab="Valores reales", xlab="Valores ajustados")
55 legend(68, 650, col=c("red","blue"), legend=c("Ajustado", "Real"),pch=20)
56 # Para hacer predicciones
57 # Se hace la predicción con los valores que salen del análisis
58 FactorA_Densidad2 <- factor(c("5.21", "15.63","26.04"))
59 FactorB_Velocidad2 <- factor(c(30,30,30))
60 FactorC_Tiempo2 <- factor(c(5,5,5))
61
62 predict(lm(Respuesta_pH ~ (FactorA_Densidad + FactorB_Velocidad + FactorC_Tiempo)^2),
63        data.frame(FactorA_Densidad= FactorA_Densidad2, FactorB_Velocidad= FactorB_Velocidad2, FactorC_Tiempo=FactorC_Tiempo2),
64        level=0.95, interval="confidence")
65
66 ## La predicción para Material 2 con Densidad de 15 es de 155.75 de duración
67 # Para probar el material más homogéneo
68 # Se aprecia que el material 3 es el más homogéneo
69 FactorA_Densidad2 <- factor(c("26.04", "26.04", "26.04"))
70 FactorB_Velocidad2 <- factor(c(30,60,90))
71 FactorC_Tiempo2<- factor(c(25,25,25))
72 predict(lm(Respuesta_pH ~ (FactorA_Densidad + FactorB_Velocidad + FactorC_Tiempo)^2),
73        data.frame(FactorA_Densidad= FactorA_Densidad2, FactorB_Velocidad= FactorB_Velocidad2, FactorC_Tiempo= FactorC_Tiempo2),
74        level=0.95, interval="confidence")
75
76
14:1 (Top Level) ± R Script ±
Console
```

Procesamiento de datos

Estimación pretest del análisis de parámetros de estudio

<i>Parámetro</i>	<i>J (Amp/m2)</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>T (°C)</i>	<i>Estimación Inicial</i>
pH	0	0	12.6	4.22
ORP	0	0	12.9	53
Conductividad	0	0	12.3	3452
STD	0	0	12.7	1380

Estimación posttest del análisis de parámetros de estudio

<i>N°</i>	<i>Ensayo</i>	<i>Densidad</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Tiempo</i>	<i>pH</i>	<i>%pH</i>
1	Tratamiento	5.21	30	5	4.25	0.71
2	1	5.21	30	5	4.28	1.40
3	Tratamiento	5.21	30	15	4.52	6.64
4	2	5.21	30	15	4.60	8.26
5	Tratamiento	5.21	30	25	4.60	8.26
6	3	5.21	30	25	4.55	7.25
7	Tratamiento	5.21	60	5	4.80	12.08
8	4	5.21	60	5	4.90	13.88
9	Tratamiento	5.21	60	15	4.85	12.99
10	5	5.21	60	15	4.85	12.99
11	Tratamiento	5.21	60	25	4.95	14.75
12	6	5.21	60	25	4.95	14.75
13	Tratamiento	5.21	90	5	4.98	15.26
14	7	5.21	90	5	4.70	10.21
15	Tratamiento	5.21	90	15	4.90	13.88
16	8	5.21	90	15	5.00	15.60
17	Tratamiento	5.21	90	25	5.00	15.60
18	9	5.21	90	25	5.10	17.25
19	Tratamiento	5.21	120	5	4.93	14.40
20	10	5.21	120	5	4.90	13.88
21	Tratamiento	5.21	120	15	5.12	17.58
22	11	5.21	120	15	5.05	16.44
23	Tratamiento	5.21	120	25	5.10	17.25
24	12	5.21	120	25	5.15	18.06
25	Tratamiento	15.63	30	5	4.70	10.21
26	13	15.63	30	5	4.75	11.16
27	Tratamiento	15.63	30	15	4.80	12.08
28	14	15.63	30	15	5.15	18.06
29		15.63	30	25	5.20	18.85

30	Tratamiento 15	15.63	30	25	5.10	17.25
31	Tratamiento 16	15.63	60	5	5.23	19.31
32		15.63	60	5	5.20	18.85
33	Tratamiento 17	15.63	60	15	5.60	24.64
34		15.63	60	15	5.50	23.27
35	Tratamiento 18	15.63	60	25	5.85	27.86
36		15.63	60	25	5.16	18.22
37	Tratamiento 19	15.63	90	5	4.95	14.75
38		15.63	90	5	4.80	12.08
39	Tratamiento 20	15.63	90	15	4.80	12.08
40		15.63	90	15	5.07	16.77
41	Tratamiento 21	15.63	90	25	5.10	17.25
42		15.63	90	25	5.90	28.47
43	Tratamiento 22	15.63	120	5	5.42	22.14
44		15.63	120	5	5.00	15.60
45	Tratamiento 23	15.63	120	15	5.80	27.24
46		15.63	120	15	5.20	18.85
47	Tratamiento 24	15.63	120	25	5.32	20.68
48		15.63	120	25	5.30	20.38
49	Tratamiento 25	26.04	30	5	4.48	5.80
50		26.04	30	5	4.52	6.64
51	Tratamiento 26	26.04	30	15	4.56	7.46
52		26.04	30	15	4.62	8.66
53	Tratamiento 27	26.04	30	25	5.30	20.38
54		26.04	30	25	4.80	12.08
55	Tratamiento 28	26.04	60	5	5.40	21.85
56		26.04	60	5	5.25	19.62
57	Tratamiento 29	26.04	60	15	5.32	20.68
58		26.04	60	15	5.29	20.23
59	Tratamiento 30	26.04	60	25	5.30	20.38
60		26.04	60	25	4.80	12.08
61	Tratamiento 31	26.04	90	5	5.40	21.85
62		26.04	90	5	5.25	19.62
63	Tratamiento 32	26.04	90	15	5.95	29.08
64		26.04	90	15	5.82	27.49
65	Tratamiento 33	26.04	90	25	5.70	25.96
66		26.04	90	25	5.70	25.96
67	Tratamiento 34	26.04	120	5	5.40	21.85
68		26.04	120	5	5.25	19.62
69	Tratamiento 35	26.04	120	15	5.40	21.85
70		26.04	120	15	5.30	20.38
71	Tratamiento 36	26.04	120	25	4.26	0.94
72		26.04	120	25	4.32	2.31

<i>N°</i>	<i>Ensayo</i>	<i>Densidad</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Tiempo</i>	<i>ORP</i>	<i>%ORP</i>
1	Tratamiento	5.21	30	5	55	3.64
2	1	5.21	30	5	56	5.36
3	Tratamiento	5.21	30	15	60	11.67
4	2	5.21	30	15	62	14.52
5	Tratamiento	5.21	30	25	73	27.40
6	3	5.21	30	25	72	26.39
7	Tratamiento	5.21	60	5	60	11.67
8	4	5.21	60	5	62	14.52
9	Tratamiento	5.21	60	15	94	43.62
10	5	5.21	60	15	92	42.39
11	Tratamiento	5.21	60	25	98	45.92
12	6	5.21	60	25	85	37.65
13	Tratamiento	5.21	90	5	71	25.35
14	7	5.21	90	5	71	25.35
15	Tratamiento	5.21	90	15	90	41.11
16	8	5.21	90	15	98	45.92
17	Tratamiento	5.21	90	25	95	44.21
18	9	5.21	90	25	110	51.82
19	Tratamiento	5.21	120	5	60	11.67
20	10	5.21	120	5	69	23.19
21	Tratamiento	5.21	120	15	75	29.33
22	11	5.21	120	15	85	37.65
23	Tratamiento	5.21	120	25	135	60.74
24	12	5.21	120	25	145	63.45
25	Tratamiento	15.63	30	5	94	43.62
26	13	15.63	30	5	91	41.76
27	Tratamiento	15.63	30	15	185	71.35
28	14	15.63	30	15	193	72.54
29	Tratamiento	15.63	30	25	260	79.62
30	15	15.63	30	25	260	79.62
31	Tratamiento	15.63	60	5	120	55.83
32	16	15.63	60	5	128	58.59
33	Tratamiento	15.63	60	15	220	75.91
34	17	15.63	60	15	225	76.44
35	Tratamiento	15.63	60	25	305	82.62
36	18	15.63	60	25	311	82.96
37	Tratamiento	15.63	90	5	142	62.68
38	19	15.63	90	5	145	63.45
39	Tratamiento	15.63	90	15	160	66.88
40	20	15.63	90	15	165	67.88
41	Tratamiento	15.63	90	25	180	70.56
42	21	15.63	90	25	190	72.11

43	Tratamiento	15.63	120	5	153	65.36
44	22	15.63	120	5	155	65.81
45	Tratamiento	15.63	120	15	160	66.88
46	23	15.63	120	15	162	67.28
47	Tratamiento	15.63	120	25	170	68.82
48	24	15.63	120	25	180	70.56
49	Tratamiento	26.04	30	5	185	71.35
50	25	26.04	30	5	175	69.71
51	Tratamiento	26.04	30	15	165	67.88
52	26	26.04	30	15	164	67.68
53	Tratamiento	26.04	30	25	170	68.82
54	27	26.04	30	25	168	68.45
55	Tratamiento	26.04	60	5	186	71.51
56	28	26.04	60	5	180	70.56
57	Tratamiento	26.04	60	15	235	77.45
58	29	26.04	60	15	238	77.73
59	Tratamiento	26.04	60	25	336	84.23
60	30	26.04	60	25	330	83.94
61	Tratamiento	26.04	90	5	164	67.68
62	31	26.04	90	5	160	66.88
63	Tratamiento	26.04	90	15	230	76.96
64	32	26.04	90	15	220	75.91
65	Tratamiento	26.04	90	25	225	76.44
66	33	26.04	90	25	226	76.55
67	Tratamiento	26.04	120	5	165	67.88
68	34	26.04	120	5	155	65.81
69	Tratamiento	26.04	120	15	155	65.81
70	35	26.04	120	15	160	66.88
71	Tratamiento	26.04	120	25	180	70.56
72	36	26.04	120	25	195	72.82

<i>N°</i>	<i>Ensayo</i>	<i>Densidad</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Tiempo</i>	<i>CE</i>	<i>%CE</i>
1	Tratamiento	5.21	30	5	3450	0.06
2	1	5.21	30	5	3445	0.20
3	Tratamiento	5.21	30	15	3435	0.49
4	2	5.21	30	15	3436	0.47
5	Tratamiento	5.21	30	25	3409	1.26
6	3	5.21	30	25	3400	1.53
7	Tratamiento	5.21	60	5	3385	1.98
8	4	5.21	60	5	3379	2.16
9	Tratamiento	5.21	60	15	3351	3.01
10	5	5.21	60	15	3347	3.14

11	Tratamiento	5.21	60	25	3300	4.61
12	6	5.21	60	25	3291	4.89
13	Tratamiento	5.21	90	5	3446	0.17
14	7	5.21	90	5	3440	0.35
15	Tratamiento	5.21	90	15	3290	4.92
16	8	5.21	90	15	3284	5.12
17	Tratamiento	5.21	90	25	3275	5.40
18	9	5.21	90	25	3262	5.82
19	Tratamiento	5.21	120	5	3220	7.20
20	10	5.21	120	5	3214	7.41
21	Tratamiento	5.21	120	15	3115	10.82
22	11	5.21	120	15	3110	11.00
23	Tratamiento	5.21	120	25	3120	10.64
24	12	5.21	120	25	3115	10.82
25	Tratamiento	15.63	30	5	3420	0.94
26	13	15.63	30	5	3416	1.05
27	Tratamiento	15.63	30	15	3430	0.64
28	14	15.63	30	15	3435	0.49
29	Tratamiento	15.63	30	25	3375	2.28
30	15	15.63	30	25	3370	2.43
31	Tratamiento	15.63	60	5	3345	3.20
32	16	15.63	60	5	3340	3.35
33	Tratamiento	15.63	60	15	3340	3.35
34	17	15.63	60	15	3336	3.48
35	Tratamiento	15.63	60	25	3275	5.40
36	18	15.63	60	25	3270	5.57
37	Tratamiento	15.63	90	5	3250	6.22
38	19	15.63	90	5	3245	6.38
39	Tratamiento	15.63	90	15	3274	5.44
40	20	15.63	90	15	3261	5.86
41	Tratamiento	15.63	90	25	3215	7.37
42	21	15.63	90	25	3200	7.88
43	Tratamiento	15.63	120	5	3192	8.15
44	22	15.63	120	5	3190	8.21
45	Tratamiento	15.63	120	15	3142	9.87
46	23	15.63	120	15	3120	10.64
47	Tratamiento	15.63	120	25	3100	11.35
48	24	15.63	120	25	3094	11.57
49	Tratamiento	26.04	30	5	3390	1.83
50	25	26.04	30	5	3386	1.95
51	Tratamiento	26.04	30	15	3400	1.53
52	26	26.04	30	15	3402	1.47
53	Tratamiento	26.04	30	25	3355	2.89
54	27	26.04	30	25	3356	2.86

55	Tratamiento	26.04	60	5	3320	3.98
56	28	26.04	60	5	3328	3.73
57	Tratamiento	26.04	60	15	3310	4.29
58	29	26.04	60	15	3315	4.13
59	Tratamiento	26.04	60	25	3248	6.28
60	30	26.04	60	25	3240	6.54
61	Tratamiento	26.04	90	5	3230	6.87
62	31	26.04	90	5	3225	7.04
63	Tratamiento	26.04	90	15	3245	6.38
64	32	26.04	90	15	3225	7.04
65	Tratamiento	26.04	90	25	3185	8.38
66	33	26.04	90	25	3005	14.88
67	Tratamiento	26.04	120	5	3170	8.90
68	34	26.04	120	5	3162	9.17
69	Tratamiento	26.04	120	15	3225	7.04
70	35	26.04	120	15	3240	6.54
71	Tratamiento	26.04	120	25	3250	6.22
72	36	26.04	120	25	3241	6.51

<i>N°</i>	<i>Ensayo</i>	<i>Densidad</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Tiempo</i>	<i>STD</i>	<i>% STD</i>
1	Tratamiento	5.21	30	5	1360	1.47
2	1	5.21	30	5	1352	2.07
3	Tratamiento	5.21	30	15	1321	4.47
4	2	5.21	30	15	1320	4.55
5	Tratamiento	5.21	30	25	1300	6.15
6	3	5.21	30	25	1290	6.98
7	Tratamiento	5.21	60	5	1275	8.24
8	4	5.21	60	5	1273	8.41
9	Tratamiento	5.21	60	15	1256	9.87
10	5	5.21	60	15	1259	9.61
11	Tratamiento	5.21	60	25	1229	12.29
12	6	5.21	60	25	1220	13.11
13	Tratamiento	5.21	90	5	1180	16.95
14	7	5.21	90	5	1176	17.35
15	Tratamiento	5.21	90	15	1143	20.73
16	8	5.21	90	15	1140	21.05
17	Tratamiento	5.21	90	25	1113	23.99
18	9	5.21	90	25	1101	25.34
19	Tratamiento	5.21	120	5	1210	14.05
20	10	5.21	120	5	1215	13.58
21	Tratamiento	5.21	120	15	1200	15.00
22	11	5.21	120	15	1225	12.65

23	Tratamiento	5.21	120	25	1195	15.48
24	12	5.21	120	25	1198	15.19
25	Tratamiento	15.63	30	5	1339	3.06
26	13	15.63	30	5	1335	3.37
27	Tratamiento	15.63	30	15	1305	5.75
28	14	15.63	30	15	1301	6.07
29	Tratamiento	15.63	30	25	1275	8.24
30	15	15.63	30	25	1279	7.90
31	Tratamiento	15.63	60	5	1252	10.22
32	16	15.63	60	5	1250	10.40
33	Tratamiento	15.63	60	15	1236	11.65
34	17	15.63	60	15	1231	12.10
35	Tratamiento	15.63	60	25	1205	14.52
36	18	15.63	60	25	1200	15.00
37	Tratamiento	15.63	90	5	1157	19.27
38	19	15.63	90	5	1153	19.69
39	Tratamiento	15.63	90	15	1135	21.59
40	20	15.63	90	15	1130	22.12
41	Tratamiento	15.63	90	25	1092	26.37
42	21	15.63	90	25	1090	26.61
43	Tratamiento	15.63	120	5	1236	11.65
44	22	15.63	120	5	1335	3.37
45	Tratamiento	15.63	120	15	1125	22.67
46	23	15.63	120	15	1136	21.48
47	Tratamiento	15.63	120	25	1230	12.20
48	24	15.63	120	25	1243	11.02
49	Tratamiento	26.04	30	5	1324	4.23
50	25	26.04	30	5	1324	4.23
51	Tratamiento	26.04	30	15	1292	6.81
52	26	26.04	30	15	1290	6.98
53	Tratamiento	26.04	30	25	1250	10.40
54	27	26.04	30	25	1243	11.02
55	Tratamiento	26.04	60	5	1330	3.76
56	28	26.04	60	5	1335	3.37
57	Tratamiento	26.04	60	15	1240	11.29
58	29	26.04	60	15	1245	10.84
59	Tratamiento	26.04	60	25	1185	16.46
60	30	26.04	60	25	1180	16.95
61	Tratamiento	26.04	90	5	1110	24.32
62	31	26.04	90	5	1102	25.23
63	Tratamiento	26.04	90	15	1006	37.18
64	32	26.04	90	15	985	40.10
65	Tratamiento	26.04	90	25	1196	15.38
66	33	26.04	90	25	1190	15.97

67	Tratamiento	26.04	120	5	1103	25.11
68	34	26.04	120	5	1112	24.10
69	Tratamiento	26.04	120	15	1130	22.12
70	35	26.04	120	15	1118	23.43
71	Tratamiento	26.04	120	25	1183	16.65
72	36	26.04	120	25	1180	16.95

Resultados en cada prueba realizada en las 72 corridas experimentales

<i>N°</i>	<i>Ensayo</i>	<i>Densidad</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Tiempo</i>	<i>pH</i>	<i>%pH</i>	<i>ORP</i>	<i>%ORP</i>	<i>CE</i>	<i>%CE</i>	<i>STD</i>	<i>% STD</i>
1	Tratamiento 1	5.21	30	5	4.25	0.71	55	3.64	3450	0.06	1360	1.47
2		5.21	30	5	4.28	1.40	56	5.36	3445	0.20	1352	2.07
3	Tratamiento 2	5.21	30	15	4.52	6.64	60	11.67	3435	0.49	1321	4.47
4		5.21	30	15	4.60	8.26	62	14.52	3436	0.47	1320	4.55
5	Tratamiento 3	5.21	30	25	4.60	8.26	73	27.40	3409	1.26	1300	6.15
6		5.21	30	25	4.55	7.25	72	26.39	3400	1.53	1290	6.98
7	Tratamiento 4	5.21	60	5	4.80	12.08	60	11.67	3385	1.98	1275	8.24
8		5.21	60	5	4.90	13.88	62	14.52	3379	2.16	1273	8.41
9	Tratamiento 5	5.21	60	15	4.85	12.99	94	43.62	3351	3.01	1256	9.87
10		5.21	60	15	4.85	12.99	92	42.39	3347	3.14	1259	9.61
11	Tratamiento 6	5.21	60	25	4.95	14.75	98	45.92	3300	4.61	1229	12.29
12		5.21	60	25	4.95	14.75	85	37.65	3291	4.89	1220	13.11
13	Tratamiento 7	5.21	90	5	4.98	15.26	71	25.35	3446	0.17	1180	16.95
14		5.21	90	5	4.70	10.21	71	25.35	3440	0.35	1176	17.35
15	Tratamiento 8	5.21	90	15	4.90	13.88	90	41.11	3290	4.92	1143	20.73
16		5.21	90	15	5.00	15.60	98	45.92	3284	5.12	1140	21.05
17	Tratamiento 9	5.21	90	25	5.00	15.60	95	44.21	3275	5.40	1113	23.99
18		5.21	90	25	5.10	17.25	110	51.82	3262	5.82	1101	25.34
19	Tratamiento 10	5.21	120	5	4.93	14.40	60	11.67	3220	7.20	1060	30.19
20		5.21	120	5	4.90	13.88	69	23.19	3214	7.41	1056	30.68
21	Tratamiento 11	5.21	120	15	5.12	17.58	75	29.33	3115	10.82	1042	32.44
22		5.21	120	15	5.05	16.44	85	37.65	3110	11.00	1039	32.82
23	Tratamiento 12	5.21	120	25	5.10	17.25	135	60.74	3120	10.64	986	39.96
24		5.21	120	25	5.15	18.06	145	63.45	3115	10.82	980	40.82

25	Tratamiento	15.63	30	5	4.70	10.21	94	43.62	3420	0.94	1339	3.06
26	13	15.63	30	5	4.75	11.16	91	41.76	3416	1.05	1335	3.37
27	Tratamiento	15.63	30	15	4.80	12.08	185	71.35	3430	0.64	1305	5.75
28	14	15.63	30	15	5.15	18.06	193	72.54	3435	0.49	1301	6.07
29	Tratamiento	15.63	30	25	5.20	18.85	260	79.62	3375	2.28	1275	8.24
30	15	15.63	30	25	5.10	17.25	260	79.62	3370	2.43	1279	7.90
31	Tratamiento	15.63	60	5	5.23	19.31	120	55.83	3345	3.20	1252	10.22
32	16	15.63	60	5	5.20	18.85	128	58.59	3340	3.35	1250	10.40
33	Tratamiento	15.63	60	15	5.60	24.64	220	75.91	3340	3.35	1236	11.65
34	17	15.63	60	15	5.50	23.27	225	76.44	3336	3.48	1231	12.10
35	Tratamiento	15.63	60	25	5.85	27.86	305	82.62	3275	5.40	1205	14.52
36	18	15.63	60	25	5.96	29.19	311	82.96	3270	5.57	1200	15.00
37	Tratamiento	15.63	90	5	4.95	14.75	142	62.68	3250	6.22	1157	19.27
38	19	15.63	90	5	4.80	12.08	145	63.45	3245	6.38	1153	19.69
39	Tratamiento	15.63	90	15	4.80	12.08	160	66.88	3274	5.44	1135	21.59
40	20	15.63	90	15	5.07	16.77	165	67.88	3261	5.86	1130	22.12
41	Tratamiento	15.63	90	25	5.10	17.25	180	70.56	3215	7.37	1092	26.37
42	21	15.63	90	25	5.90	28.47	190	72.11	3200	7.88	1090	26.61
43	Tratamiento	15.63	120	5	5.42	22.14	153	65.36	3192	8.15	1046	31.93
44	22	15.63	120	5	5.00	15.60	155	65.81	3190	8.21	1035	33.33
45	Tratamiento	15.63	120	15	5.00	15.60	160	66.88	3142	9.87	1025	34.63
46	23	15.63	120	15	5.20	18.85	162	67.28	3120	10.64	1036	33.20
47	Tratamiento	15.63	120	25	6.30	33.02	170	68.82	3100	11.35	956	44.35
48	24	15.63	120	25	6.40	34.06	180	70.56	3094	11.57	950	45.26
49	Tratamiento	26.04	30	5	5.15	18.06	185	71.35	3390	1.83	1324	4.23
50	25	26.04	30	5	5.25	19.62	175	69.71	3386	1.95	1324	4.23
51		26.04	30	15	6.55	35.57	165	67.88	3400	1.53	1292	6.81

52	Tratamiento 26	26.04	30	15	6.60	36.06	164	67.68	3402	1.47	1290	6.98
53	Tratamiento	26.04	30	25	5.30	20.38	170	68.82	3355	2.89	1250	10.40
54	27	26.04	30	25	4.80	12.08	168	68.45	3356	2.86	1243	11.02
55	Tratamiento	26.04	60	5	5.40	21.85	236	77.54	3320	3.98	1330	3.76
56	28	26.04	60	5	5.25	19.62	242	78.10	3328	3.73	1335	3.37
57	Tratamiento	26.04	60	15	6.05	30.25	235	77.45	3310	4.29	1240	11.29
58	29	26.04	60	15	6.00	29.67	238	77.73	3315	4.13	1245	10.84
59	Tratamiento	26.04	60	25	5.30	20.38	336	84.23	3248	6.28	1198	15.19
60	30	26.04	60	25	4.80	12.08	330	83.94	3240	6.54	1190	15.97
61	Tratamiento	26.04	90	5	5.40	21.85	220	75.91	3230	6.87	1110	24.32
62	31	26.04	90	5	5.25	19.62	223	76.23	3225	7.04	1102	25.23
63	Tratamiento	26.04	90	15	5.95	29.08	230	76.96	3245	6.38	1006	37.18
64	32	26.04	90	15	5.82	27.49	220	75.91	3225	7.04	985	40.10
65	Tratamiento	26.04	90	25	5.70	25.96	225	76.44	3185	8.38	1076	28.25
66	33	26.04	90	25	5.70	25.96	226	76.55	3170	8.90	1078	28.01
67	Tratamiento	26.04	120	5	5.40	21.85	165	67.88	3170	8.90	1010	36.63
68	34	26.04	120	5	5.25	19.62	155	65.81	3162	9.17	1009	36.77
69	Tratamiento	26.04	120	15	5.40	21.85	155	65.81	3225	7.04	1003	37.59
70	35	26.04	120	15	5.30	20.38	160	66.88	3240	6.54	1005	37.31
71	Tratamiento	26.04	120	25	5.30	20.38	180	70.56	3250	6.22	1028	34.24
72	36	26.04	120	25	5.60	24.64	195	72.82	3241	6.51	1032	33.72
Media					5.22	18.40	157.29	57.42	3288.50	5.07	1169.29	19.30

Dimensiones del sistema de electrocoagulación

<i>DIMENSIONES DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACION</i>											
<i>DIMENSIONES DEL SISTEMA BATCH</i>					<i>DIMENSIONES DE PLACAS</i>						
<i>Diámetro (cm)</i>	<i>Ancho (cm)</i>	<i>Área (cm²)</i>	<i>Volumen (cm³)</i>	<i>Volumen (L)</i>	<i>Largo (cm)</i>	<i>Altura (cm)</i>	<i>Espesor (cm)</i>	<i>Área (cm²)</i>	<i>Área (m²)</i>	<i>Placas</i>	<i>Distancia/placas (cm)</i>
10.5	14.5	86.588	1255.52	1.26	8	12	0.2	96	0.0192	6	5.5

<i>Calculo de la Densidad de CE</i>		
<i>Intensidad (Amp)</i>	<i>Área (m²)</i>	<i>Densidad (Amp/m²)</i>
0.1	0.0192	5.21
0.3	0.0192	15.63
0.5	0.0192	26.04

Maqueta de un sistema de electrocoagulación con electrodos de rotación

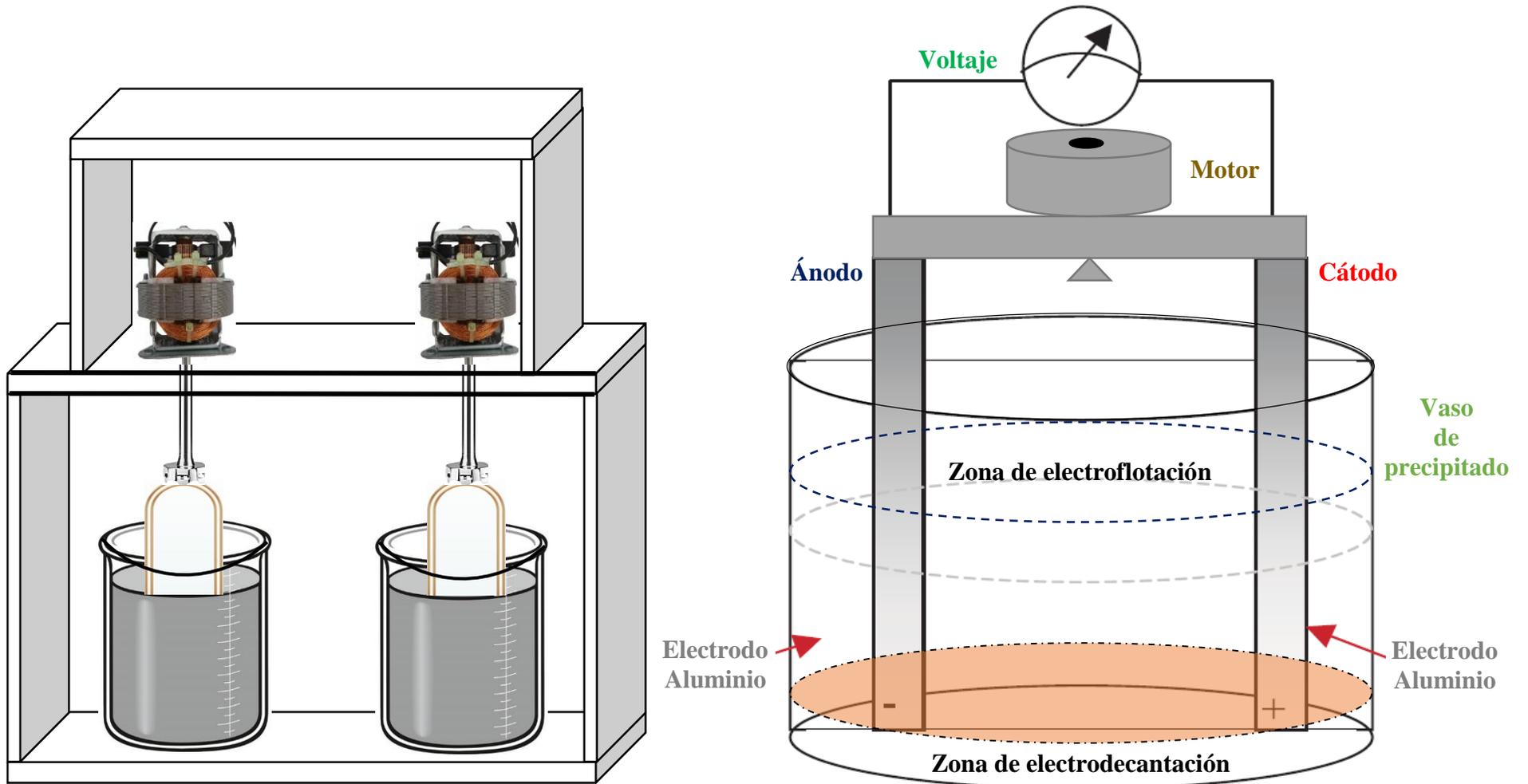


Gráfico de correspondencia de valores del agua respecto al pH y ORP

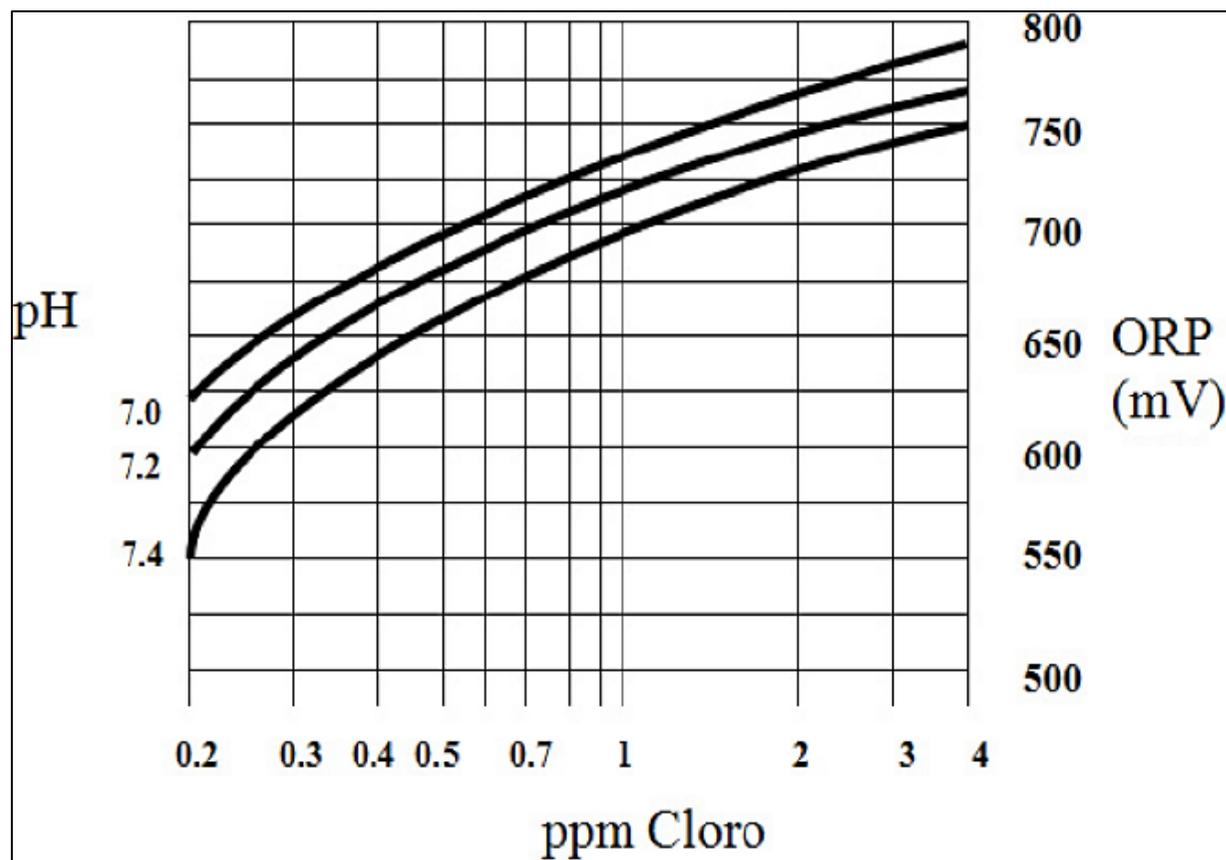


Tabla de valores del agua respecto al pH y ORP

ORP/mV vs. pH

pH

ORP/mV

pH	6.9	7	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	8	8.1	8.2	ppm Cl
mV	507	505	502	500	499	497	496	494	493	491	490	488	487	0.2
mV	561	558	553	550	548	546	544	541	539	536	534	532	529	0.3
mV	599	596	590	586	583	580	577	574	571	568	565	562	559	0.4
mV	629	625	618	615	611	607	604	600	597	593	590	586	583	0.5
mV	652	648	640	637	632	629	625	621	617	613	610	605	602	0.6
mV	663	658	650	646	642	638	634	630	626	622	618	614	610	0.65
mV	673	669	660	656	651	647	643	639	635	630	626	622	618	0.67
mV	682	677	668	664	660	655	651	647	642	638	634	629	625	0.75
mV	690	686	677	672	668	663	659	654	650	645	641	636	632	0.8
mV	698	694	684	680	675	670	666	661	657	652	647	643	638	0.85
mV	706	702	692	687	682	677	673	668	663	658	654	649	644	0.9
mV	713	708	698	694	689	684	679	674	669	664	659	654	650	0.95
mV	720	715	705	700	695	690	685	680	675	670	665	660	655	1
mV	733	727	717	712	707	701	696	691	686	680	675	670	665	1.1
mV	744	739	728	722	717	712	706	701	695	690	685	679	674	1.2
mV	755	749	738	732	727	721	716	710	705	699	694	688	682	1.3
mV	765	759	747	742	736	730	724	719	713	707	702	696	690	1.4
mV	774	768	756	750	744	738	732	727	721	715	709	703	697	1.5
mV	790	784	771	765	759	753	747	741	735	728	722	716	710	1.7
mV	798	792	779	773	766	760	754	748	741	735	729	722	716	1.8
mV	812	805	792	785	779	773	766	760	753	747	740	734	727	2
mV	824	818	804	797	791	784	777	771	764	757	751	744	737	2.2
mV	841	834	826	813	806	800	792	785	778	771	764	757	751	2.5